

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Erkki Reponen

Puutavarakouran staattinen lujuustarkastelu

Opinnäytetyö
18.9.2015



OPINNÄYTETYÖ

Syyskuu 2015

Kone- ja tuotantotekniikan koulutus-
ohjelma

Karjalankatu 3

80200 JOENSUU

p. (013) 260 6800 p. (013) 260 6906

Tekijä

Erkki Ilmari Reponen

Nimeke

Puutavarakouran staattinen lujuustarkastelu

Toimeksiantaja

Karelia-ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Opinnäytetyön aiheena oli tarkastella Outokummun Metalli Oy:n valmistamaa Vahva-merkkistä puutavarakouraa venymäliuskamittauksella.

Työ koostuu puutavarakourasta tehdystä venymäliuskamittauksesta staattisessa kuormituksessa ja siitä tehdystä FEM – analyysistä, sekä näiden kahden vertailusta toisiinsa. Työtä varten selvitettiin teoriaa venymistä, yhdessä lovivaikutusten ja syntyvien jännityksien kanssa. Tärkeänä osana työtä oli varsinaisen venymäliuskamittauksen valmistelu ja suorittaminen.

Tuloksia vertailemalla löydettiin joitain yhteneväisyyksiä, mutta myös joitain selkeitä eroavaisuuksia, mallinnettujen ja mitattujen arvojen välillä. Havaitut erot tulosten välillä johtuivat todennäköisesti mittaustilanteen kuormitussuuntien eroista mallinnettuihin kuormiin verrattuna. Staattisten mittausten avulla pystytään tekemään venymäliuskojen asemointi puutavarakouraan kenttäolosuhteissa tehtävää venymäliuskamittausta varten.

Kieli

suomi

Sivuja 51

Liitteet 2

Liitesivumäärä 3

Asiasanat

venymäliuska, FEM

**THESIS****September 2015****Degree Programme in Mechanical and
Production Engineering**

Karjalankatu 3

FI 80200 JOENSUU

p. (013) 260 6800 p. (013) 260 6906

Author

Erkki Ilmari Reponen

Title

Static strength analysis of a Log grapple

Commissioned by

Karelia University of applied sciences

Abstract

The subject of the thesis was to take measurements with strain gauges from a log wood grapple, model Vahva, which was manufactured by Outokummun Metalli Oy.

The thesis consists of measurements taken from the grapple with strain gauges under static loads and from FEM – analysis and the comparison of these two. Theories regarding strain, along with notch effects and the stresses produced were also researched. An important part of the thesis was the preparation and execution of the actual strain gauge measurement.

By comparing the results, some similarities were found but also some clear differences between the modeled and the measured values. The observed differences between the results were likely due to differences in load directions during measurement situations compared to the modeled loads. Use of these static measurements will enable the positioning of strain gauges on to the log grapple for following strain gauge measurements to be done in field conditions.

Language

Finnish

Pages 51

Appendices 2

Pages of Appendices 3

Keywords

strain gauge, FEM

Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto.....	7
1.1	Outokummun Metalli Oy	7
1.2	Opinnäytetyö ja sen tavoitteet	7
2	Venymäliuskamittaus	9
2.1	Venymäliuska.....	9
2.1.1	Toimintaperiaate	9
2.2	Venymä	11
2.2.1	Johtimen resistanssi.....	11
2.3	Jännityksen ja venymän yhteys	13
2.3.1	Tasojännitystila	14
2.3.2	Kaksiakselinen jännitystila.....	14
2.3.3	Wheatstonen silta	16
2.3.4	Neljännessilta	17
2.3.5	Puolisilta.....	18
2.3.6	Täyssilta	19
2.3.7	Venymäliuskamittauksen lämpökompensointi	20
3	Teräsrakenteen tutkiminen väsyttävässä kuormituksessa	22
3.1	Väsyttävä kuormitus.....	22
3.1.1	Väsymismitoitusmenetelmät	22
3.1.2	SN-käyrä	23
3.2	Tehollinen lovijännitysmenetelmä	24
3.2.1	Tehollisen lovijännityksen laskeminen	25
3.3	Hot-spot menetelmä ja rakenteellinen jännitys	25
3.3.1	Hot spot jännityksen määrittäminen.....	27
4	Puutavarakahmarin analysointi staattisessa kuormituksessa.....	29
4.1	Lähtötilanne.....	29
4.2	FEM – analyysi	29
4.3	Alustava FEM – analyysi	30
4.3.1	Mallin valmistelu	30
4.3.2	Analyysin suoritus.....	31
4.3.3	Tulokset.....	32
4.4	Venymäliuskamittaus	33
4.4.1	Mittauspisteiden valinta	33
4.4.2	Liimauspinnan valmistelu metalleilla	35
4.4.3	Venymäliuskojen asennus	36
4.4.4	Tulokset.....	42
4.4.5	Virhearviointi	44
4.5	Mittausta vastaava FEM – analyysi	44
4.5.1	Tulokset.....	45
5	Tulosten vertailu staattisessa kuormituksessa	46
6	Puutavarakahmarin venymäliuskamittauksen suunnittelu kenttäolosuhteisiin	47
7	Pohdinta.....	49

Lähdeluettelo.....	51
--------------------	----

Liitteet

Liite 1	Venymäliuskan asennuksen vaiheet
Liite 2	Pääjännitysten ja suuntien laskenta kolmehilaisista rusettiliuskoista

Lyhenteet ja merkinnät

A Poikkileikkauksen pinta-ala [mm^2]

C Väsymiskapasiteetti

E Materiaalin kimmokerroin [MPa]

FAT Hitsiliitoksen väsymislujuutta kuvaava kerroin

FEM Finite Element Method, Elementtimenetelmä. Tunnetaan myös nimellä FEA.

k Liuskavakio [-]

m S-N-käyrän kaltevuus [-]

R_e Materiaalin myötälujuus [MPa]

R_m Materiaalin murtolujuus [MPa]

t Levyn paksuus [mm]

V_{in} Sisään menevä jännite [U]

V_{out} Ulos tuleva jännite [U]

ρ materiaalin resistiivisyys [Ωm]

ν Poissonin vakio

$\Delta\sigma$ jännitysvaihtelu [MPa]

σ_N kestoraja

σ_{Hs} Rakenteellinen hot spot-jännitys [MPa]

σ_p suhteellisuusraja

1 Johdanto

1.1 Outokummun Metalli Oy

Outokummun Metalli Oy on vuonna 1980 perustettu merkittävä kone- ja laitevalmistuksen järjestelmätoimittaja. Outokummun Metalli Oy on maailman suurin harvesteripäiden runkojen valmistaja. Maailmalle on toimitettu jo yli 9000 Outokummun Metallin valmistamaa harvesteripäätä. [1;2]

Yhtiön noin 5800 neliömetrin tuotantotilat sijaitsevat Pohjois-Karjalassa Outokummussa. Outokummun Metalli Oy hankki prosessorikouran tuoteoikeudet vuonna 1984 ja aloitti harvesteripään tuotekehityksen. Vuodesta 2011 konserniin kuulunut Koneosapalvelu Oy toimittaa varaosia ja huolto-palveluita mm. metsäkoneisiin ja raskaalle kalustolle. [2]

Vuonna 2003 Outokummun Metalli Oy ja John Deere Forestry Oy perustivat yhteisyrityksen Waratah OM Oy:n, joka vastaa harvesteripäiden tuotekehityksestä, valmistuksesta ja tuotetuesta. Waratah OM Oy:n harvesteripäiden valmistus ja kokoonpano tehdään Outokummun Metallin Sysmäjärven tehtaalla. [3]

1.2 Opinnäytetyö ja sen tavoitteet

Työssä oli tarkasteltavana Outokummun Metalli Oy:n valmistama Vahva-merkkinen puutavarakoura. Tasakärkiset kahmarit ovat tarkoitettu ainespuun kuljetukseen puutavara-autokäyttöön. Ajokoneiden tehtävänä on kerätä metsästä, kouralla varustetulla nosturilla, varsinaisen hakkuukoneen käsittelemät puut ja kuljettaa ne tien varteen kasoihin, josta puutavara-auto voi ne noutaa.

Työtä varten opeteltiin venymäliuskoihin liittyvää teoriaa ja niiden asennusta. Työ koostui FEM – analyysistä ja venymäliuskamittauksesta, sekä näiden kahden vertailusta toisiinsa. Tärkeänä osana työtä oli myös venymäliuskamittauksen valmistelun vaiheet, sekä teoreettinen tieto siitä, miten sähkövastuksen muutoksesta saadaan selville rakenteessa vaikuttava jännitys. Työssä sivuttiin myös hitsatun rakenteen väsymiskestävyyttä. Outokummun Metalli Oy:lle toimitettiin versio opinnäytetyöstä, jossa näkyivät venymäliuskamittauksien ja FEM – analyysien tulokset kokonaisuudessaan.



Kuvio 1. Vahva-puutavarakourat ovat Outokummun Metalli Oy:n tehtaalla Outokummussa valmistettuja, Koneosapalvelun kautta myytäviä tuotteita. [4]

Vahva-kahmarin (kuvio 1) rakenteessa, yksi keskitetty sylinteri käyttää suoraan molempia leukoja ja kahdella vakaajatangolla varmistetaan tasainen mekaaninen kuormitus. Taivutetut, erikoislujasta teräksestä valmistetut levyosat on pyritty suunnittelemaan valmistusystävällisesti ja rakenteessa on hyödynnetty aikaisemmista malleista saatua kokemusta. [4]

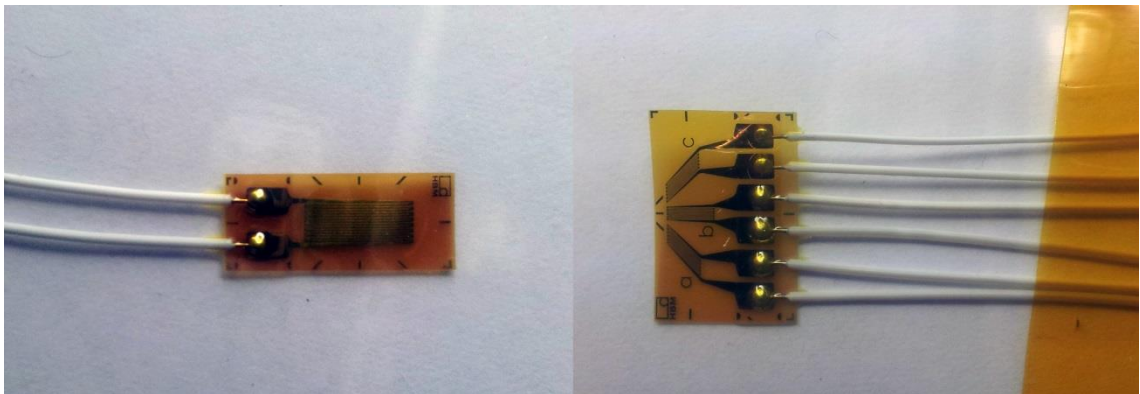
2 Venymäliuskamittaus

2.1 Venymäliuska

Venymäliuskoja käytetään usein apuna konetekniikan tutkimuksissa mittaamaan rakenteissa syntyviä jännityksiä. Mekaaninen rasitus aiheuttaa resistanssin muutoksen venymäliuskoissa käytetyssä johtimessa, jolloin rakenteen jännitykset saadaan laskettua. Jännityksen mittaaminen venymäliuskalla edellyttää, että tutkittavan kappaleen kokema jännitys välittyy ilman häviöitä venymäliuskaan ja siinä syntyvää resistanssin muutosta kyetään mittaamaan. [5]

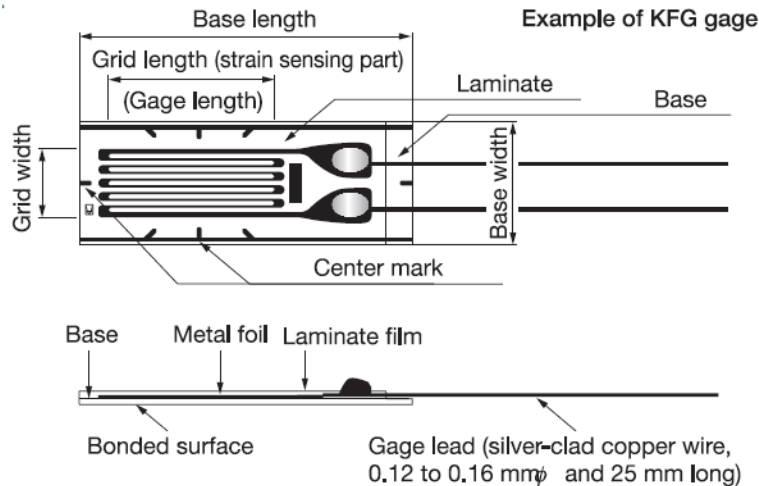
2.1.1 Toimintaperiaate

Venymäliuskan toiminnallinen osa (kuvio 2) koostuu läpimitaltaan pienestä johtimesta, usein muutaman mikrometrin paksuisesta Cu-Ni-foliosta, joka on laminoitu ohuesta muovista valmistettuun tukimateriaaliin. Useimmat venymäliuskat ovat pienempiä kuin postimerkki. Venymäliuskoja on olemassa vaihteleviin mittaussovelluksiin metalleille, komposiittimateriaaleille ja muoveille. Venymäliuskojen yleisimpiä resistanssin arvoja ovat 120, 350, ja 1000 Ω . [5]



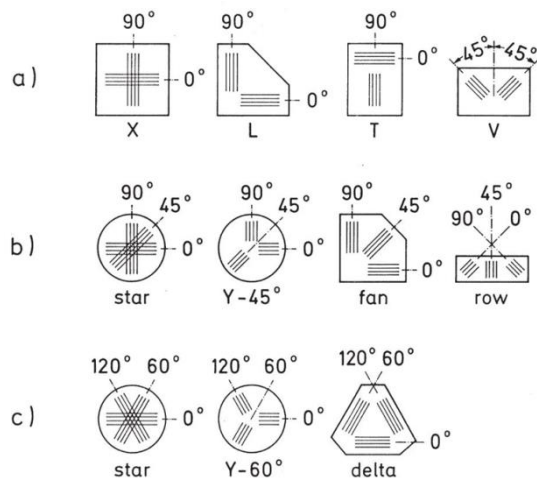
Kuvio 2. HBM venymäliuskoja, vasemmalla normaali 6 mm kokoinen venymäliuska ja oikealla 45 asteen rusettiliuska.

Anturijohtimen silmukoinnin takia venymäliuskalla on toiminnallinen suunta, sillä kuvion poikkipinta-ala on minimoitu leikkausjännityksen ja Poissonin vaikutuksen vähentämiseksi. Kuviossa 3 näkyy venymäliuskan rakenne tarkemmin.



Kuvio 3. Venymäliuskan rakenne. [6]

Mitattu jännitys on aina keskiarvo venymäliuskan mittaavan osan alueella. Erilaisen ruudukon pituuden lisäksi on olemassa useita erilaisia malleja, kuten venymäliuskarusetteja, joissa kolme mittausruudukkoa on järjestetty tietyin kulmavälein samalle alustalle (kuvio 4). [5]



Kuvio 4. Erilaisia venymäliuskarusetteja: a) liuskojen mittahilat ovat 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden, b) kolme mittahilaa 45 asteen kulmissa ja c) 60 asteen erot mittaus-suunnissa. [5]

2.2 Venymä

Venymä on suhteellinen luku, joka riippuu kappaleen alkuperäisestä ja muuttuneesta pituudesta kaavan 1 mukaan. Venymästä käytetään yleisesti merkintää $\mu\epsilon$, jolla tarkoitetaan kerrointa 10^{-6} . Kaava pätee tapauksissa, joissa jännitys on yksiakselinen.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

jossa ϵ on venymä (strain), Δl on pituuden muutos ja l on alkuperäinen pituus. [5]

2.2.1 Johtimen resistanssi

Sähkönjohtavuuden resistanssi R , pituudeltaan l ja poikkipinta-alaltaan A olevassa johtimessa saadaan kaavasta

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2)$$

jossa ρ on materiaalin resistiivisyys eli ominaisvastus, l on johdon pituus ja A on poikkipinta-ala. [5]

Kun kappaleeseen kohdistuu voima F sen alkuperäinen pituus l_0 kasvaa tai pienenee Δl :n verran, jolloin myös johtimen poikkipinta-ala muuttuu vaikuttaen sen sähköiseen vastukseen.

$$\Delta l = l - l_0 \quad (3)$$

jossa Δl on suhteellinen venymä, l on kappaleen muuttunut pituus ja l_0 on alkuperäinen pituus. [5]

Kun venymä kasvaa, johdon poikkipinta-ala A pienenee jolloin puolestaan resistanssi R kasvaa (kuvio 5). Liuskan suhteelliseen vastuksen muutokseen vaikuttaa venymä ε ja liuskavakio k kaavan 4 mukaan

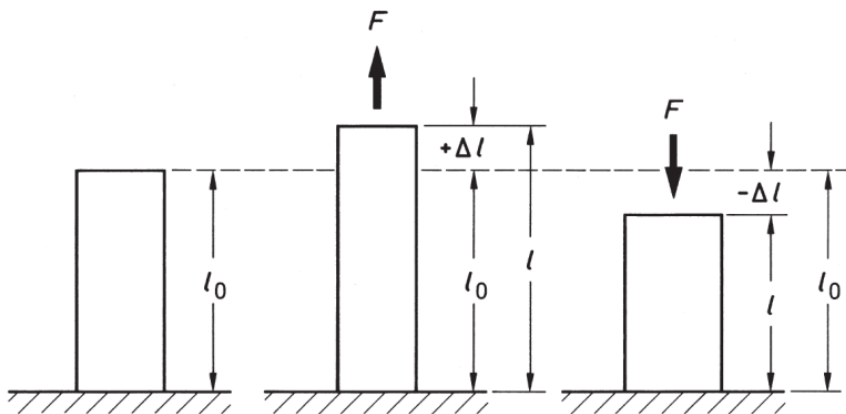
$$\frac{\Delta R}{R_0} = k\varepsilon_a \quad (4)$$

jossa k on liuskavakio, ε_a on venymä, ΔR on resistanssi muutos ja R_0 on alkuperäinen resistanssi. [5]

Venymäliuskojen liuskavakio k määrittää liuskan herkkyyden.

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} = 2 \frac{\Omega/\Omega}{m/m} \quad (5)$$

jossa k on venymäliuskavakio, tyypillisesti noin 2. [5]



Kuvio 5. Suhteellinen venymä. [5]

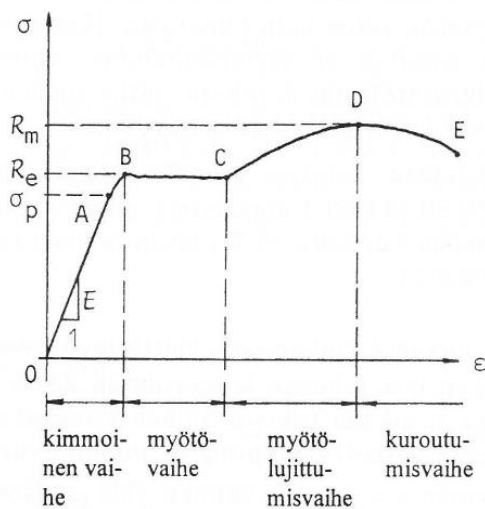
Tavallisesti venymäliuskamittauksissa jännityksen aiheuttama resistanssin muutos on niin pieni, ettei sitä kyetä mittaamaan suoraan. Resistanssi on ensin muunnettava jännitteeksi käyttäen Wheatstonen siltaa. [5]

2.3 Jännityksen ja venymän yhteys

Kappaletta kuormitettaessa sen sisälle syntyy jännityksiä, jotka vastustavat muodonmuutosta. Venymällä ε ja jännityksellä σ on kaavan 6 mukainen yhteys, jota kutsutaan jännitys-venymäyhteydeksi. Jännitys voi olla mekaanista tai lämpötilan aiheuttamaa. [5]

$$\sigma = \sigma(\varepsilon) \quad (6)$$

Venymän ja jännityksen suhdetta voidaan tarkastella venymäpiirroksista. Joustavien rakennemateriaalien tapauksessa, venymän on todettu olevan lineaarisesti verrannollinen rasitukseen likimain myötörajaan R_e saakka. Kuviossa 6 esitetystä, erään sitkeän rakenneteräksen $\sigma\varepsilon$ – käyrästä nähdään, että kuvaajan alkuosa on likimain suora suhteellisuusrajaan σ_p saakka, jonka jälkeen materiaali alkaa käyttäytyä peruuttamattomasti. [7]



Kuvio 6. Erään sitkeän materiaalin $\sigma\varepsilon$ – käyrä. [7]

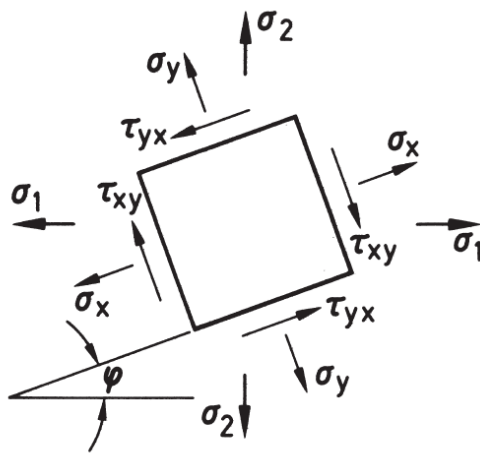
Kappaleen kokema jännitys voidaan laskea Hooken lain (kaava 7) avulla materiaaleilla, jotka käyttäytyvät isotrooppisesti ja ovat lineaarisesti kimmoisia. Jännitys lasketaan materiaalin kimmokerroimen ja venymän avulla

$$\sigma = E\varepsilon \quad (7)$$

jossa σ on jännitys, E = kimmokerroin, ε on venymä pääsuunnassa. [7]

2.3.1 Tasojännitystila

Pisteen yleinen jännitystila esitetään kuudella itsenäisellä normaali- ja leikkausjännityskomponentilla kuvion 7 mukaisesti. Tasojännitystilalla tarkoitetaan niiden kaksiulotteisten tasojen määrittämistä, joista pisteen suurimmat normaali- ja leikkausjännitykset löytyvät. Tasojännitystila esitetään pisteen normaalijännityskomponenteilla σ_x , σ_y ja leikkausjännityskomponentilla τ_{xy} . Suurin jännitys esiintyy yleisesti kappaleen pinnassa, vaikuttavan voiman suuntaisesti. [5]



Kuvio 7. Jännityselementti, jota on käännetty kulman φ verran pääsuuntaan nähden [5]

Tasojännitystilassa pääjännitykset σ_1 ja σ_2 saavat suurimmat ja pienimmät arvonsa suunnissa 1 ja 2, jolloin leikkausjännityksestä τ tulee nolla. Jos yksi pääjännityksistä (suuruus ja suunta) tunnetaan, pystytään Mohrin ympyrän avulla määrittämään halutut tason jännitykset. [5]

2.3.2 Kaksiakselinen jännitystila

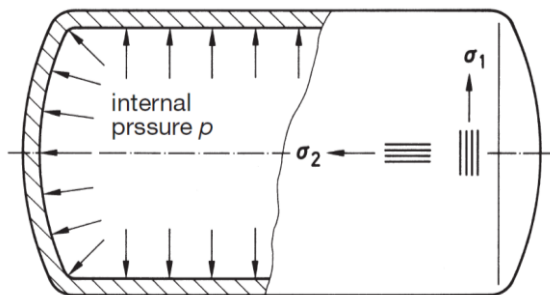
Kuviossa 8 on esitetty paineastiaan syntyvien tunnettujen pääjännitysten suunnat. Normaalijännitykset σ_1 ja σ_2 lasketaan Hooken lain laajennetulla versiolla mitattujen venymien ε_1 ja ε_2 , materiaalin kimmokertoimen E ja Poissonin vakion ν avulla kaavojen 8 ja 9 mukaan

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu * \varepsilon_2) \quad (8)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu * \varepsilon_1) \quad (9)$$

Oletetaan, että jännitys σ_3 pääsuuntaan 3 (kohtisuorassa pintaan nähden) on nolla. [5]

Tapauksissa, joissa pääjännityksien suuntaa ei voida rakenteen muodosta tai kuormituksesta johtuen määrittää, täytyy venymä mitata kolmessa eri suunnassa samanaikaisesti yhden pisteen suhteen. Nämä suunnat, jotka eivät välttämättä ole linjassa pääsuuntien kanssa, merkitään kirjaimilla a , b ja c . Venymät näissä suunnissa merkitään ε_a , ε_b ja ε_c . Rusetin mallisia venymäliuskoja käytetään usein erilaisissa mittauksissa venymien määrittämiseen. [5]



Kuvio 8. Pääjännitykset paineastiassa. [5]

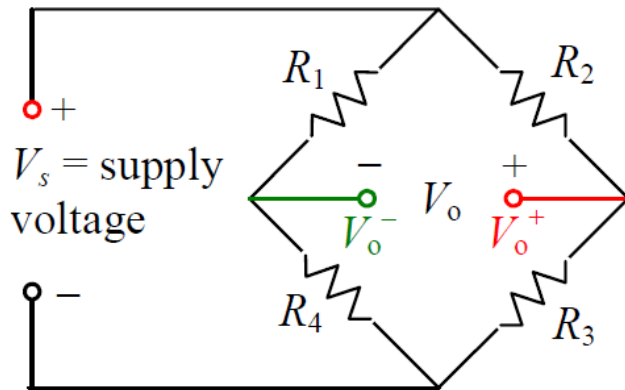
Mitattujen venymien avulla voidaan jännitykset laskea kaavalla 10 ja niiden suunnat ratkaista liitteessä 1 esitetyn tavan mukaan. Teoria kulman määrittämiselle on johdettu Mohrin jännitysympyrästä.

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} * \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} * \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad (10)$$

jossa pääjännitykset σ_1 ja σ_2 , E on materiaalin kimmomoduuli, ν on Poissonin vakio ja venymät ε_a , ε_b , ε_c suunnissa 0° , 45° ja 90° . [5]

2.3.3 Wheatstonen silta

Englantilainen tiedemies Sir Charles Wheatstone kehitti vuonna 1843 piirin, joka mahdollisti sähköisen vastuksen tarkan mittaamisen. Jännite V_s syötetään virtapiiriin, joka sisältää neljä vastusta, ja ulostuleva jännite V_o mitataan keskellä siltaa, kuvion 9 mukaisesti. Kaavoissa oletetaan, että ulostulojännitteen V_o mittalaitteella on ääretön impedanssi, jolloin sillä ei ole vaikutusta tuloksiin. [5]



Kuvio 9. Wheatstonen siltakytkentä. V_s on siltaan syötettävä jännite, V_o sillasta ulostuleva jännite. Vastukset R1-R4 korvataan kytkennästä riippuen venymäliuskoilla. [5]

Ulostulojännite, Ohmin laki

$$V_o = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (11)$$

jossa ulostuleva jännite on V_o , syötetty jännite V_s ja vastukset R1-R4.

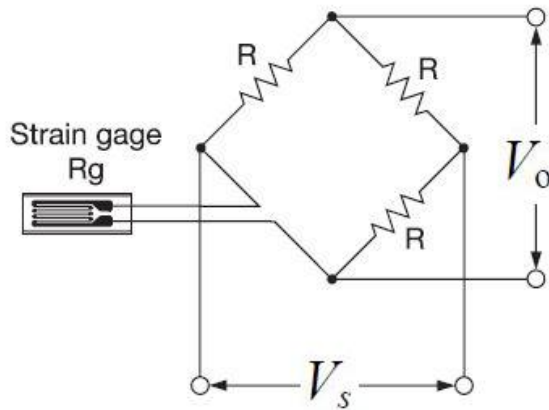
Wheatstonen silta on tasapainossa, kun

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (12)$$

Ulostulojännite on tällöin nolla. Käytännössä myös samansuuruisissa vastuksissa on eroavaisuuksia, joten potentiometri on usein kytketty yhden vastuksen paikalle, jolloin silta saadaan säätämällä tasapainoon. [5]

2.3.4 Neljännessilta

Jännityksen mittaamiseksi yksi vastuksista Wheatstonen sillassa korvataan venymälius-
kalla, kuvion 10 mukaisesti.



Kuvio 10. Neljännessilta jossa V_s on siltaan syötettävä jännite ja V_o on sillasta ulostuleva jännite. [6]

Sillasta ulostuleva jännite V_o voidaan Wheatstonen sillassa laskea siltaan syötetyn jän-
nitteen V_s , ja tunnettujen vastusten avulla. ΔR_3 on venymäliuskan kokema resistanssin
muutos. [6]

$$V_o = V_s \frac{\Delta R_3 * R_1}{(R_2 + R_{3,alussa} + \Delta R_3)(R_1 + R_4)} \quad (13)$$

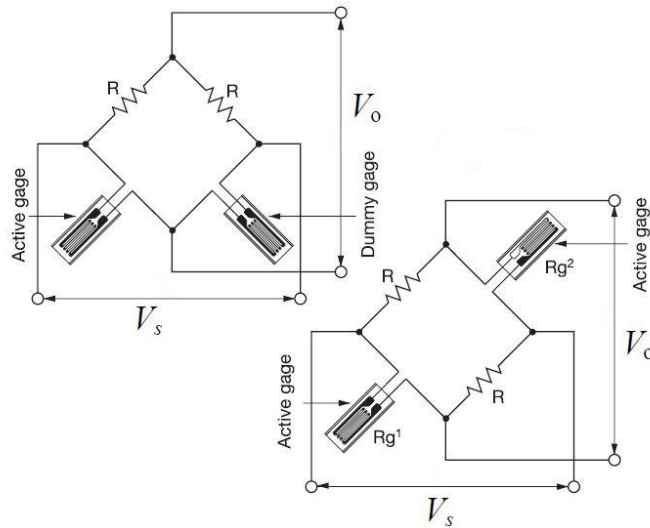
Kaava 13 pätee vain, jos silta oli alussa tasapainossa. Resistanssin muutos venymäantu-
rissa on hyvin pieni, joten kaava voidaan sieventää seuraavaan muotoon.

$$\varepsilon_a \approx \frac{V_o}{V_s} \frac{1}{k} \frac{(R_2 + R_{3,alussa})^2}{R_2 R_{3,alussa}} \quad (14)$$

jossa ε_a on liuskan venymä, k on liuskavakio, V_s on siltaan tuleva jännite ja V_o on sil-
lasta ulostuleva jännite. [6]

2.3.5 Puolisilta

Kun kaksi venymäanturia kytketään Wheatstonen siltaan vastusten paikalle kuvion 11 mukaisesti, kutsutaan kytkentää puolisoliksi.

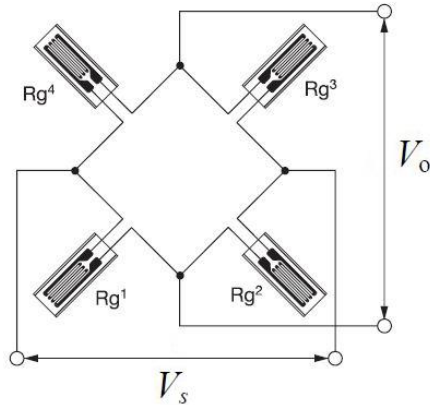


Kuvio 11. Puolisiltakytkentä, jossa vasemmalla olevassa kytkennässä venymää mittaa aktiivinen liuska ja ei halutun venymän, kuten lämpötilan aiheuttaman, kompensointiin käytetään Dummy-liuskaa. Oikealla olevassa kytkennässä käytetään kahta aktiivista venymäliuskaa, joilla mitataan samaa rasitustilannetta suuremmalla herkkyydellä. [6]

Piirin herkkyys on kaksinkertainen, kun käytetään puolisoliskytkentää verrattuna neljännessiltään. Etumerkkien merkitys on huomioitava käytettäessä kahta aktiivista venymäliuskaa. [6]

2.3.6 Täyssilta

Täyssillassa kaikki vastukset korvataan venymäantureilla (kuvio 12).



Kuvio 12. Täyssiltakytcentä. [6]

Jos halutaan kaikkien venymäliuska-antureiden mittaavan samaa fysikaalista suuretta, sillan vierekkäisissä vastuksissa pitää tapahtua resistanssin muutos erisuuntiin. Täyssillan herkkyys on nelinkertainen verrattuna neljännessilltaan.

$$\varepsilon_a \approx \frac{V_o}{V_s} \frac{1}{k} \quad (15)$$

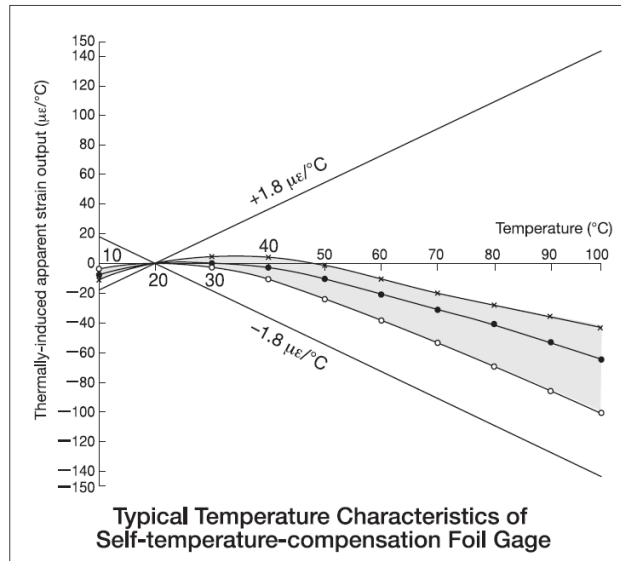
tai

$$V_o \approx \varepsilon_a k V_s \quad (16)$$

joissa ε_a on venymä, k on liuskavakio, V_s on siltaan syötettävä jännite ja V_o on sillasta ulostuleva jännite. [6]

2.3.7 Venymäliuskamittauksen lämpökompensointi

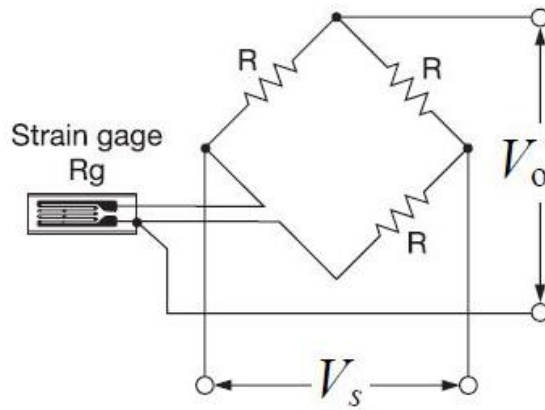
Venymäliuskoja on saatavana lämpötilakompensoituina materiaalin lämpölaajenemis-kerrointa vastaavaksi. Tietyillä valmistusmenetelmillä, seosmetalleilla tai lämpökäsitellyllä on mahdollista minimoida lämpötilanmuutoksesta aiheutuva näennäinen venymä rajatulla lämpötilan alueella (kuvio 13). Vakiolämpötilassa johtimen resistanssi kasvaa lineaarisesti venymän kanssa. [5]



Kuvio 13. Lämpötilakompensoidun liuskan käyttäytymiskäyrä. [6]

Jos materiaalille ei ole saatavilla sopivaa venymäliuskaa, voidaan käyttää Wheatstonen sillan mahdollistamia kompensointitapoja. Siltakytkennän kompensointi perustuu sillan eri puolilla vallitsevaan tasapainoon. Eripuolille siltaa kytketyt venymäliuskat kompensoivat toisensa täysin olettaen, että signaaleilla on sama amplitudi. [5]

Venymäliuskat vaativat toimiakseen ulkoisen jännitelähteen, jolloin venymäliuskoissa ja johtimissa syntyy lämpöä. Neljännessillassa käytetään usein kolmijohdinmenetelmää kuvion 14 mukaisesti, jossa liuskan kolmas johdin kytketään suoraan vahvistimeen. Kytkentä kompensoi johtimien lämpiämisestä johtuvan resistanssin muutoksen. [5]



Kuvio 14. Neljännessillassa käytettävän kolmijohdinkytkennän periaate. [6]

3 Teräsrakenteen tutkiminen väsyttävässä kuormituksessa

3.1 Väsyttävä kuormitus

Väsyminen on tärkeä dynaamisesti kuormitettujen osien suunnittelussa ja kehityksen aikana huomioitava asia. Väsymislaskenta pohjautuu runsaaseen testiaineistoon ja testituloksista johdettuihin materiaalin käyttäytymismalleihin. Laajimmalle levinnyt väsymisen arviointimenetelmä on vertailla suunnittelujännityksiä sallittuihin jännityksiin. Väsymislaskennan päätarkoitus on pyrkiä selvittämään vaihtelevan kuormituksen alaisen kappaleen elinikä. [7]

IIW (International Institute of Welding) on määrittänyt tietyille rakenteen yksityiskohdille ja hitsaustapauksille väsytyluokan (FAT) välille 36 ...160 MPa. FAT – luokka kertoo, millä kuormitustasolla tietty rakenteen yksityiskohta kestää 2 miljoonaa kuormanvaihtoa. [9]

3.1.1 Väsymismitoitusmenetelmät

Hitsiliitoksissa jännitysvaihteluiden aiheuttamana väsyminen alkaa hitsin rajaviivalta, juuresta tai sisäisestä viasta. Rakenne murtuu alkusärön kasvaessa kriittiseksi. Hitsausliitosten väsymislujuutta ja kestoikää voidaan analysoida nimellisten jännitysten avulla ja hot spot – menetelmällä. Lovijännityksiin tai venymiin perustuvat menetelmät ja murtumismekaniikka ovat hitsausliitosten kannalta pääasiassa laskennallisia menetelmiä. [7]

Väsymisenkestoikä määritetään usein väsytykokeilla, joissa käytetään kolmea kuormitustyyppiä: veto-puristuskoe, taivutuskoe ja vääntökoe. Testeissä väsyttävä kuormitus on vakioamplitudista jännitysvaihtelua minimi- ja maksimiarvon välillä, mutta todellisuudessa hitsattujen työkonoiden kuormitus on usein epämääräistä. Valmiiksi ennustettua materiaalin väsymiskestävyyttä on myös muokattava, jos tutkittava rakenne poikkeaa testin tilanteesta. Ulkoiset tekijät kuten kappaleen koko, kuormitustyyppi, pinnan laatu ja ympäristötekijät myös vaikuttavat väsymiskestävyyden arvoon. [8]

Hitsattujen rakenteiden väsymistarkastelun perusteena on yleisesti jännityksen vaihteluväli $\Delta\sigma$, joka tarkoittaa kokonaisjännityksen vaihtelua yhden syklin aikana.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (17)$$

jossa jännityksen vaihteluväli on $\Delta\sigma$, suurin jännitys on σ_{max} ja pienin on σ_{min} . [8]

3.1.2 SN-käyrä

Jännitys-kestoikä-käyriä kutsutaan myös S-N – käyriksi tai Wöhlerin – käyriksi. Nämä käyrät voivat perustua nimellisiin jännityksiin tai lovijännityksiin. S-N – käyrien avulla voidaan määrittää väsymisenkestoikä N .

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma^m} \quad (18)$$

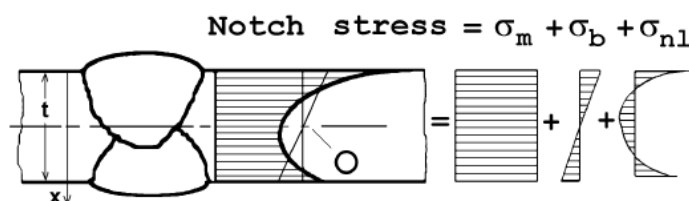
Muuttuja C on tietyn rakennedetaljin väsymiskapasiteetti $2 * 10^6$ kuormitusjaksolla. $\Delta\sigma$ on rakenteeseen kohdistuvan jännitysvaihtelun suuruus ja eksponentti m on S-N – käyrän kulmakerroin. [9]

Merkitään jännityssyklien lukumäärää symbolilla n . Sitä syklien lukumäärää $n = N$, joka johtaa kulloisellakin jännitystasolla koekappaleen murtumiseen, sanotaan kestopuvuksi. Näin ollen kestopuku N kuvaa koekappaleen väsymisikää kyseisellä jännitystasolla. Kestolukua N vastaavaa jännitysamplitudia kutsutaan kestorajaksi σ_N . [9]

Nimellinen jännitys on tarkastelukohdan poikkipinta-alalla laskettu jännitys, joka ei ota huomioon hitsausliitoksen paikallista jännitystä nostavaa vaikutusta, mutta huomioi muodonmuutokset tarkastelukohdan läheisyydessä, kuten esim. suuret aukot ja epäkeskisyydet. Nimellisen jännityksen S-N – käyrä on siksi aina sidottu tiettyyn geometrian ja jännityksen yhdistelmään. [9]

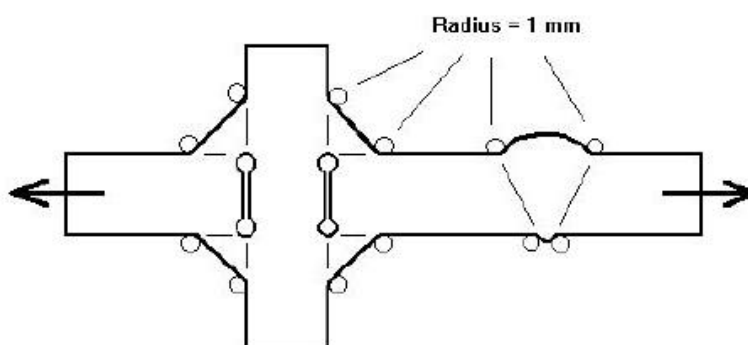
3.2 Tehollinen lovijännitysmenetelmä

Rakenteiden väsymisvaurio syntyy yleensä aina sellaiseen kohtaan, johon on syntynyt jännityskeskittymä. Yleisin syy jännityskeskittymän synnylle ovat erilaiset geometriset epäjatkuvuudet kuten loven urat, olakkeet ja reiät. Loven läheisyydessä kappaleen jännitys jakaantuu epälineaarisesti levyn poikkileikkauksen alueelle kuvion 15 esimerkin mukaisesti. [9]



Kuvio 15. Lovijännitys koostuu kalvojännityksestä σ_m , taivutusjännityksestä σ_b ja epälineaarisesta huippujännityksestä σ_{nl} . [9]

Tehollinen lovijännitys tarkoittaa kokonaisjännitystä loven juuressa. Jotta voitaisiin ottaa huomioon vaihtelu hitsin muodossa, sekä materiaalin epälineaarinen käyttäytyminen loven juuressa, hitsin todelliset ääriiviat korvataan tietokonemalleissa tehokkain lovimuodoin (kuvio 16). Rakenneteräksille ja alumiiniseoksille tehollisen juuriloven säteen $r = 1 \text{ mm}$ on todettu antavan johdonmukaisia tuloksia. [9]



Kuvio 16. Tehollinen juuriloven säde. [9]

Menetelmä on rajoitettu hitsiliitoksiin, joissa mahdollinen väsymismurtuma syntyy hitsin reunaan tai hitsin juuren. Arviointi on tämän lisäksi suoritettava hitsin reunasta rakennemateriaalille, käyttäen rakenteellista hot spot – jännitystä ja siihen liittyvää väsy-

misluokkaa (FAT). Hitsin reunassa, tehollisen lovi­jännityksen voi olettaa olevan vähintään 1,6-kertainen rakenteelliseen hot spot – jännitykseen verrattuna. [9]

3.2.1 Tehollisen lovi­jännityksen laskeminen

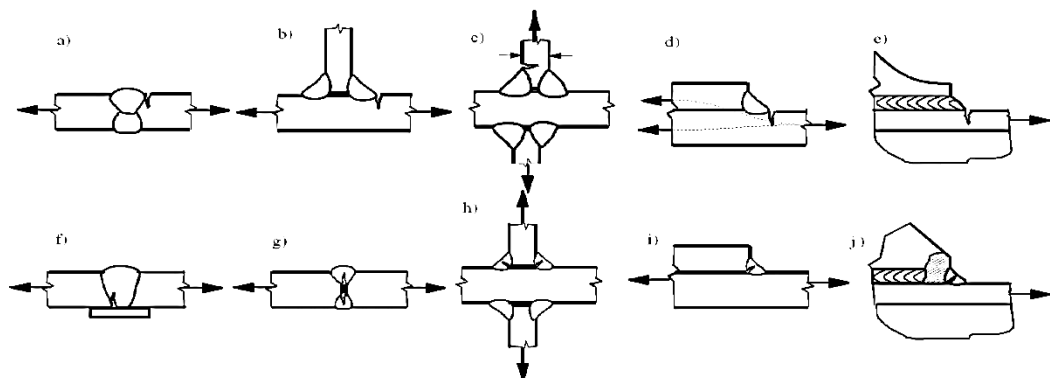
Lovenpohjalla vaikuttava jännitys lasketaan kertomalla rakenteellinen jännitys lovenmuotoluvulla K_t . Jos lovenmuotolukua ei ole määritetty, voidaan lovi­jännitys määrittää elementtimenetelmällä. FEM-menetelmässä suositellaan käytettävän elementtien kokoja, jotka ovat alle neljäsosan kuvitteellisesta juuriloven säteestä. Mahdollinen hitsauksen linjausvirhe on huomioitava laskelmissa. [9]

Yksinkertaisimmallaan loven muotoluvulla K_t tarkoitetaan paikallisen jännityshuipun σ_{max} ja kaukana epäjatkuvuuskohdasta vallitsevan nimellisjännityksen σ_{min} suhdetta. [9]

$$K_t = \sigma_{max} / \sigma_{min} \quad (19)$$

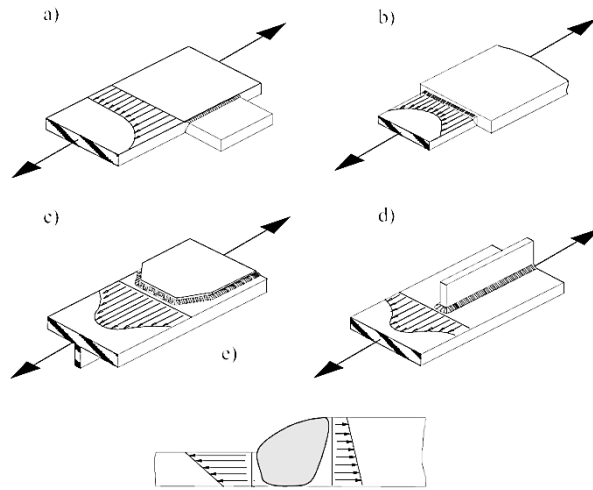
3.3 Hot-spot menetelmä ja rakenteellinen jännitys

Hot spot - jännitys σ_{hs} on rakenteellinen jännitys kohdassa, johon väsymissärö todennäköisesti ydintyy. Hitsatuissa rakenteissa väsymisen aiheuttama murtuminen alkaa lähes poikkeuksetta hitsin rajaviivalta, kuvion 17 esimerkkien mukaan. Hot spot – menetelmä ei sovellu pääasiassa aksiaalisesti rasitettuihin tapauksiin, joissa pääjännitys on hitsin suuntainen. Silloin nimellisen jännitysten menetelmä on täysin käyttökelpoinen. [7]



Kuvio 17. Hitsin aiheuttaman epäjatkuvuuskohdan lovi­jännitys johtaa usein särön syntymiseen perusaineessa [9]

Hitsatuissa rakenneosissa on usein rakenteellisia epäjatkuvuuskohtia, kuten kuviossa 18 esitetyt, jotka aiheuttavat kalvojännityksen keskittymistä tai levyn taivutusjännityksiä.

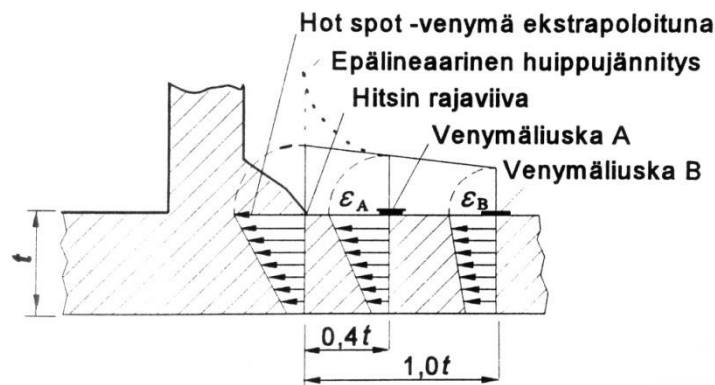


Kuvio 18. Rakenteellisia epäjatkuvuuskohtia: a) reunakorvake tai palkkien risteys, b) kuormitettu reunakorvake, c) peitelevyn pää, d) pitkittäisen rivan pää, e) levynpaksuuden epäkeskeinen muutoskohta. [9]

Rakenteelliset hot spot – jännitykset voidaan määrittää käyttäen ekstrapolointia viitepisteitä apuna käyttäen. Hitsin lähellä esiintyvä huippujännitys ei kuulu hot spot – jännityksen piiriin. [7]

3.3.1 Hot spot jännityksen määrittäminen

Kriittisen kohdan hot spot – jännitykset voidaan määrittää elementtimenetelmällä käyttäen riittävän hienojakoista kuori- tai solidielementtiverkkoa tai tekemällä venymäliuskamittauksia joko koesauvasta, olemassa olevasta kappaleesta tai prototyypistä. Jännitys voidaan myös laskea kertomalla nimellinen jännitys rakenteellisen jännityksen konsentraatiokertoimella K_S . [7]



Kuvio 19. Hot spot – liuskojen sijoitusetäisyydet hitsin reunasta, jossa t on levyn paksuus. [7]

Kokeellinen hot spot – jännityksen määrittäminen perustuu venymäliuskamittaukseen. Kun venymä on mitattu, on mahdollista päätellä Hooken lain avulla jännitys kappaleen pinnassa. Suositeltava sijoitus ja venymäliuskojen määrä riippuvat pinnan taivutusjännityksien laajuudesta, seinämän paksuudesta ja rakenteellisen jännityksen tyypistä. [9]

Loven vaikutus on hävinnyt etäisyydellä $0,4t$ hitsin rajaviivalta, jossa t on levyn paksuus. Kuviossa 19 on esitelty periaatekuva liuskojen sijoittelusta. Kaavassa 20 on esitetty hot spot – kohdan venymän laskukaava, käytettäessä lineaarista ekstrapolointia ja kahta venymäliuskaa referenssipisteissä $0,4t$ ja $1,0t$.

$$\varepsilon_{hs} = 1.67\varepsilon_{0.4t} - 0.67\varepsilon_{1.0t} \quad (20)$$

jossa ε_{hs} on hot spot – venymä, $\varepsilon_{0.4t}$ on venymä $0.4t$ etäisyydellä hitsin rajaviivasta ja $\varepsilon_{1.0t}$ on venymä $1.0t$ etäisyydellä hitsin rajaviivasta. [9]

Jos jännitystila on lähes yksiakselinen, rakenteellinen hot spot – jännitys voidaan laskea likimääräisesti yhtälöstä

$$\sigma_{hs} = E * \varepsilon_{hs} \quad (21)$$

jossa σ_{hs} on hot spot – kohdan jännitys, E on materiaalin kimmokerroin ja ε_{hs} on hot spot – venymä. [9]

Kestoiän laskeminen hot spot – jännityksellä perustuu idealisoiuihin tapauksiin, täydellisesti linjassa oleviin hitsausliitoksiin. Väsymiskestoanalyysia tehtäessä on erittäin tärkeää määrittää hot spot – kohdan sijainti ja pääjännityksen suunta oikein. [9]

4 Puutavarakahmarin analysointi staattisessa kuormituksessa

4.1 Lähtötilanne

Venymäliuskamittausta voidaan soveltaa hitsattujen rakenteiden väsymisanalyysissä FEM – tulosten vertailuun ja todenmukaisen jännityshistorian määrittämiseen [5]. Kouran osalta päädyttiin keskittymään kuviossa 20 näkyviin ylempien kolmiojäykisteiden päätehitseihin. Kolmiopalat jäykistävät rakennetta leuan runkoputken ja sivun liitoksessa.



Kuvio 20. Vahva-puutavarakouran ylemmät kolmiojäykisteet, joiden päätehitsauksia oli vahvistettu.

Kouran runkopalkin alueille tulevat jännitykset eivät ole aikaisemmissa malleissa olleet ongelmallisia väsymisvaurioiden osalta. Lisäksi sylinterin korvakkeiden hitsauksien murtumat ovat valmistajan kokemuksen mukaan erittäin harvinaisia normaalissa käytössä. Korvakkeiden hitsauksiin tulevien jännityksien ei arvioitu olevan kriittisiä, niille ennakoiduissa kuormitustilanteissa. Ongelmia odotettiin syntyvän, jos kärkilevy tai sivulevyt pääsevät taipumaan liikaa.

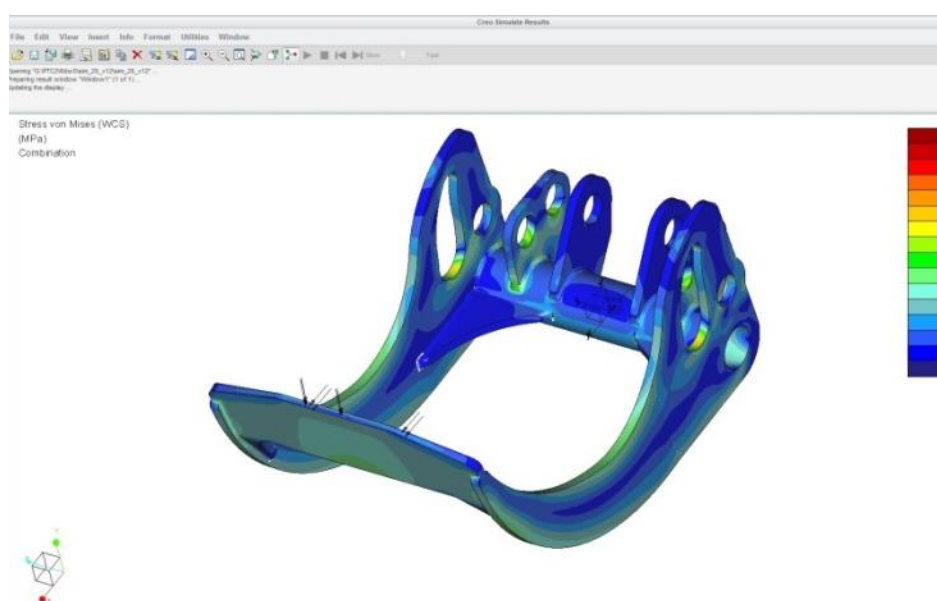
4.2 FEM – analyysi

Elementtimenetelmää (FEM, Finite Element Method) käytetään pääasiallisesti lujuuslaskennoissa, mallinnettaessa tutkittavan kappaleen kokemia kuormituksia. Tunnetaan myös termillä FEA (Finite Element Analysis). Elementtimenetelmässä todellinen kappale, olipa se kiinteä, neste tai kaasu, on edustettuna elementteinä. Nämä elementit, joiden katsotaan olevan kiinnitetty toisiinsa nivelpisteistä, muodostavat elementtiverkon.

Elementtiverkko muodostaa matriisiyhtälöiden joukon, josta voidaan ratkaista tuntemattomat suureet. Näitä likimääräisiä funktioita kutsutaan myös interpolointimalleiksi. [10]

4.3 Alustava FEM – analyysi

Puutavarakouran leukaosia tarkasteltiin yksittäisinä osina kuvion 21 mukaisesti, joten analyysiä varten niille laskettiin kuormitustilanteita ja sylinteristä syntyviä voimia vastaavat kuormitustapaukset. Voimat mallinnettiin vaikuttamaan rakenteen kärkilevylle ja osan tuenta tehtiin laakerituennalla akselien kohdalta. Sivusuunnassa rakenne tuettiin keskirunkoa vasten tulevalta putken päätypinnalta.



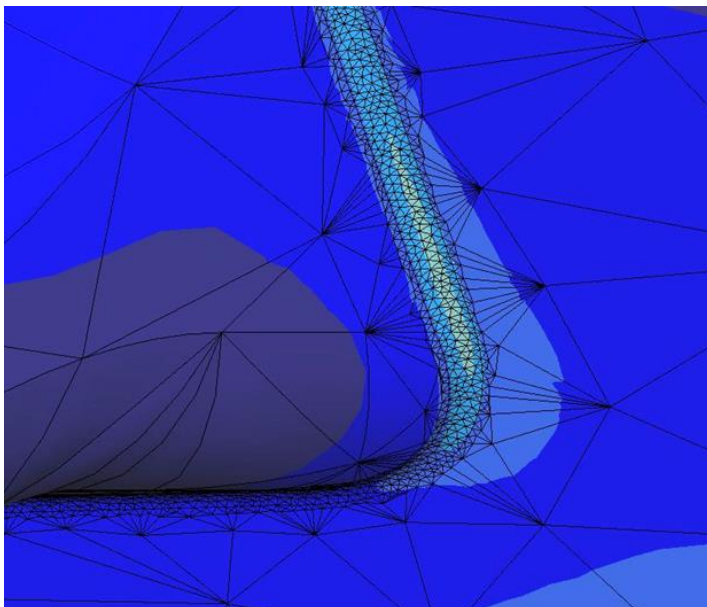
Kuvio 21. Esimerkki FEM – analyysin jännitysten jakautumisesta kahmarin leukaosassa.

4.3.1 Mallin valmistelu

Kouran kannalta yleisimmät kuormitustilanteet simuloitiin CREO Parametric Simulate – ohjelmalla. Kouran 3D-malli saatiin Outokummun Metalli Oy:ltä. Mallista poistettiin kaikki reiät ja ruuvit, jotka nähtiin tarpeettomiksi rasituksen mallintamisen kannalta. Malliin täytyi myös lisätä levyjen yhdyspintojen hitsaukset, jotka oletettiin läpihitsatuiksi.

Mallia muutettaessa laskentaa varten oli muistettava, että terävät säteet voivat moninkertaistaa jännityksiä. Kaikilla komponenteilla on rajallinen säde nurkissa, pienille sä-

teille yleinen yksinkertaistamiskeino on sivuuttaa säde ja tehdä nurkasta terävä. Tämä ei vaikuta ulospäin tulevaan kulmaan, mutta terävään sisäänpäin olevaan nurkkaan syntyy jännitys singulariteetti, jolloin jännitystaso tarkastelukohdassa kasvaa. Siksi muutoksina rakenteeseen mallinnettiin rajaviivojen pyöristykset niin sanotulla fillet – menetelmällä, jolloin hitsien rajaviivoille lisättiin materiaalia. [11]



Kuvio 22. Verkotuksen tihentäminen juuriloven säteen alueella.

Verkotusta tihennettiin tarkasteltavien hitsiliitosten kohdalla vastaamaan IIW:n asettamia suosituksia hot spot – menetelmää käytettäessä. Hot spot - tarkastelua varten otettiin verkotuksessa huomioon liuskojen asemointi solmukohtien sijoittamisessa. Elementtiverkotusta tihennettiin hitsien rajaviivojen kohdalla reunapituuteen 0.25 mm ja 5-10 mm muualla mallissa kuvion 22 mukaisesti.

4.3.2 Analyysin suoritus

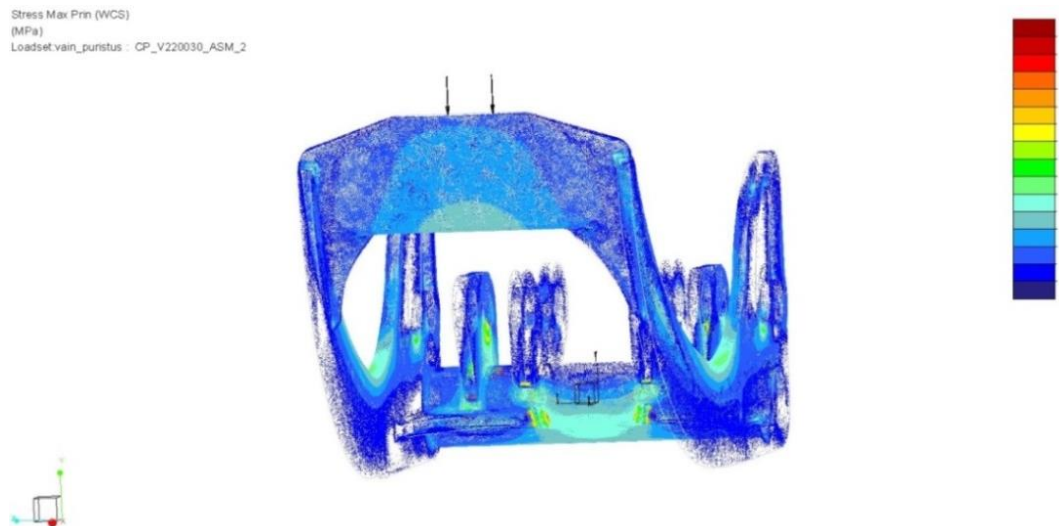
Kourasta tehtiin alustavat analyysit hyvin yksinkertaisella mallilla, analysoitiin sitä ja katsottiin, että se käyttäytyi odotetulla tavalla. Mallia sitten tarkennettiin vaiheittain, toistamalla analyysi joka kerta, kun yksityiskohtia lisättiin. Näin oli mahdollista saada tietoa merkittävistä yksityiskohdista, jotka oli sisällytettävä malliin.

Samoin toimittiin kuormitusten tapauksessa lisäämällä voimaa vähitellen ja ajamalla useita analyyseja vaihtelevilla kuormilla ja suunnilla. Kaikki venymäliuskamittauksissa

suoritetut vääntökuormitukset toteutettiin myötä- ja vastapäivään, jolloin eripuolille kahmaria sijoitetuista liuskoissa nähtiin puristusta ja vetoa.

4.3.3 Tulokset

Alustavien FEM – analyysien avulla nähtiin hitsien reunaviivoille syntyvän jännityskeskittymiä. Odotetusti rakennetta jäykistävien kolmioiden kärkien alueille syntyi huippujännityksiä, kun rakennetta kuormitettiin sivusuunnassa (kuvio 23). Erikseen tarkasteltu, rakenteen yksipuolinen vääntökuormitus näytti rasittavan kolmioita odotettua vähemmän. Pääjännityksien suunnat ja rasituskeskittymät otettiin ylös, sillä liuskat haluttiin sijoittaa niiden mukaan. FEM – analyysien tulokset on esitelty kokonaisuudessaan Outokummun Metalli Oy:lle toimitetuissa liitteissä.



Kuvio 23. Puristuksen aikaiset jännityskeskittymät. Tilanteessa vaikutti erään puristustilanteen kärkivoima.

4.4 Venymäliuskamittaus

Koura toimitettiin Karelia-ammattikorkeakoulun tiloihin maalaamattomana, jossa esivalmistelut ja liuskojen liimaus voitiin suorittaa (kuvio 24). Kouran hitsauksiin syntyviä rasituksia haluttiin tutkia, joten rakenteesta päätettiin mitata nimellisiä jännityksiä leu-kojen levypinnoilta ja kolmioiden päätehitsien hot spot – jännityksiä.



Kuvio 24. Maalaamaton Vahva-puutavarakoura.

4.4.1 Mittauspisteiden valinta

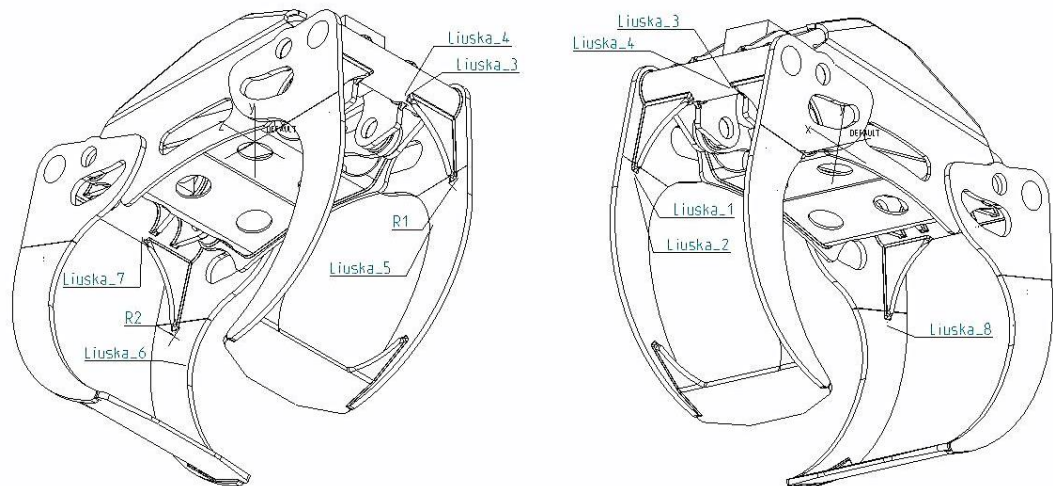
Venymäliuskojen sijoituskohteet ja suuntaus valittiin alustavien FEM – tulosten perusteella, huomioon pyrittiin ottamaan alueet, joiden kokemukseräisesti arveltiin olevan alttiita rasitusmurtumille. Mittauksissa käytettiin osaltaan rusetin tyyppisiä venymäliuskoja, joilla voitiin määrittää todellisten pääjännitysten suunnat rakenteessa. Epäsymmetrisen kuormituksen huomioiminen toteutettiin ottamalla mittauspisteitä eripuolilta kouraa. Venymäliuskoja liimattiin rakenteeseen yhteensä kymmenen, joista neljä oli 1.5 mm mittaavalla pituudella (1.5/120 LY41-3L-2M), neljä oli 6 mm (6/120 LY41-3L-2M) ja kaksi oli 45 asteen rusettiliuskoja kolmen millin mittahilalla (3/120 RY81-3L-2M).

Venymäliuskojen fyysinen muoto tuo aina mukanaan omat rajoitteensa. Venymäliuskojen mittaama venymä on keskiarvo liuskan mittaavan, usein monta millimetriä, olevan osan alueelta. Tämä voidaan hyväksyä, jos jännitykset eivät vaihteile merkittävästi mit-

tausalueella. Mutta samalla tarkoittaa, että luotettavien mittaustuloksien saanti on haastavaa alueilta, joilla esiintyy korkeita rasitusmuutoksia. Toisaalta nämä ovat usein juuri niitä paikkoja, joissa rasitusta halutaan mitata, kuten hitsin reunaviivat ja lovien reunat. [5]

Lyhyillä venymäliuskoilla on parempi geometrinen tarkkuus, sillä niiden mittaruudun koko on pienempi. Pidemmät venymäliuskat lisäävät mittauksen herkkyyttä sallien suuremman venymän samalle jännitykselle. Valitut mittauskohteet sijaitsivat pääasiassa tasaisilla levyosilla, jolloin rakennetta ei tarvinnut muuttaa koneistamalla venymäliuskojen asentamiseksi. Hot spot – kohtien mittauksissa liuskojen haluttiin olevan mahdollisimman pieniä, jotta jännityksien keskittyminen nähtäisiin paremmin.

Kuviossa 25 näkyvät venymäliuskojen asennuskohdat. Liuskat suunnattiin alustavien FEM – analyysien mukaisten pääjännityksien suuntaisesti, kuten liuskat 5 ja 6, jotka mittasivat leukojen puristuksesta syntyvää venymää reunaviivan suuntaisesti. Liuskat 1-4 olivat hot spot – kohtaa varten asennetut 1,5 mm mittaiset venymäliuskat. R1 ja R2 olivat rusetit kolmiopalojen kärjissä. Liuska 7 asennettiin samalle kohdalle kuin liuska 4, mutta kouran toiselle puolelle. Liuska 8 asennettiin vastaavasti suhteessa liuskaan 2.



Kuvio 25. Liuskojen sijoituskohdat.

Venymäliuskat sijoitettiin kouran kummallekin puolelle symmetrisesti leveämmälle ja kapeammalle puolelle. Rusettiliuskat lisättiin kouran molemmin puolin samalle kohdalle, kuin hot spot – kohtia mittaavat venymäliuskat. Tällä haluttiin tarkistaa voimien ja-

kaantuminen puristuksen aikana. Teoriassa kouran molemmille puolille kohdistuu yhtä suuri voima mutta jo erittäin pienet erot nivelpisteissä tai kuorman vaikutussuunnassa muuttavat tilannetta.

4.4.2 Liimauspinnan valmistelu metalleilla

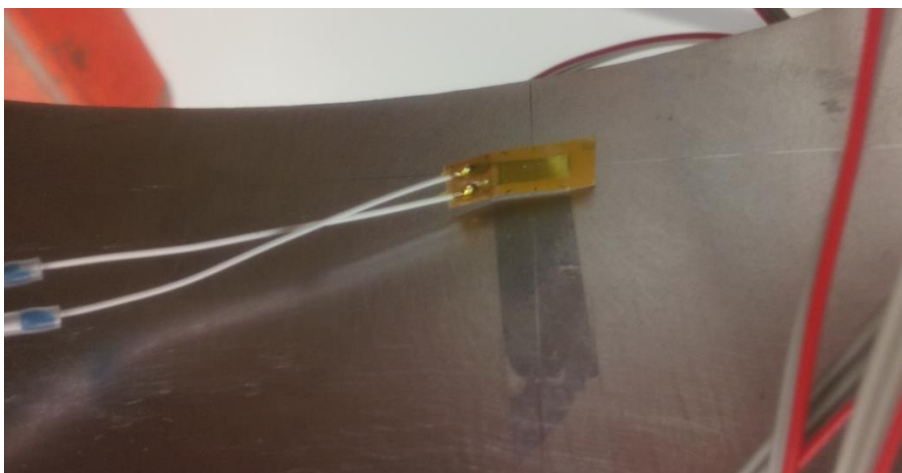
Tavoite oli luoda pinta, joka on vapaa pintahuokosista, lovista ja oksidipinnasta ja johon venymäliuska oli helposti liimattavissa. Liimauspinnan valmistelun vaiheet riippuvat materiaalin pinnan laadusta ja likaisuudesta, mutta pääpiirteittäin metallipintojen valmisteluvaiheet ovat: karkea puhdistus, pinnan hionta tasaiseksi, puhdistus, karhennus, puhdistus, linjausmerkinnät, hienopuhdistus ja rasvanpoisto. [5]

Ensimmäisessä vaiheessa poistettiin kaikki ruoste, maali, säle, öljyt ja muut epäpuhtaudet laajemmalta alueelta mittauskohdan ympäriltä. Puhdistuksessa voi tapauksen vaatiessa käyttää kaavinta tai puhdistusaineita. Pinnan hionta suoritettiin jatkuvasti hienompaa karheutta käyttäen, ensin kulmahiomakoneella edeten lopulta käsin hiontaan. Ruoste, naarmut ja muut epätasaisuudet saattavat haitata venymäliuskan kiinnittymistä. Pinta täytyi siksi tasoittaa siihen parhaiten sopivilla menetelmillä. [5]

Öljyt, lika ja hiontajäänteet tuli puhdistaa hionnan edetessä. Puhdistus tehtiin kemiallisesti puhtaalla liuottimella (RMS1). Muita puhdistuksessa mahdollisesti käytettäviä aineita ovat asetoni, isopropanoli ja etyylialkoholi. Pinnan hionnan jälkeen tehtiin lopukarhennus P220 hiomapaperilla, jolloin liimalla olisi mahdollisimman hyvä tartuntapinta. Pölyä ja kosteutta on jatkuvasti ilmassa, siksi liimauksen oli tapahduttava mahdollisimman nopeasti pinnan puhdistuksen jälkeen. [5]

4.4.3 Venymäliuskojen asennus

Kappaleen pintaan täytyi tehdä venymäliuskojen tarkan asemoinnin takia merkinnät, joista näkyy esimerkki kuviossa 26. Linjauksen tekeminen pintaa naarmuttamalla ei ole suositeltavaa. Ilman mustetta oleva kuulakärkikynä on paljon sopivampi vaihtoehto, sillä pallo jättää näkyvän viivan tekemättä naarmua. Pehmeille materiaaleille voidaan käyttää jopa pelkkää kovaa lyijykynää. Jos kynässä on jäljellä mustetta, täytyy muste poistaa viivan piirtämisen jälkeen. [5]



Kuvio 26. Liuska teipattuna linjausmerkkien mukaisesti, ennen liimausta.

Loppupuhdistus tehtiin juuri ennen liuskan liimausta. Jo hyvin pieni kerros öljyä liimauspinnalla vähentää tai poistaa kokonaan liimausvoiman, joten hyvin huolellinen loppupuhdistus oli tärkeää. [5]

Venymäliuskan liimauksen vaiheet on esitelty tarkemmin liitteessä 1. Liimana käytettiin Z70 syanoakrylaatti -pikaliimaa, joka levitettiin ohuena kerroksena kappaleen pintaan teflonliuskalla. Tämän jälkeen liuska painettiin yhdellä sulavalla peukalon pyöräytyksellä teflonkalvoa apuna käyttäen metallipintaan, jolloin liuskan alla oleva ylimääräinen liima pusertui pois. Liuskaa pidettiin painettuna pintaa vasten noin puolitoista minuuttia (kuvio 27). [5]



Kuvio 27. Liuskojen liimaus Z70 -pikaliimalla, joka salli ja vaati nopean työtahdin.

Kuivumisajan jälkeen tarkistettiin asennettu liuska visuaalisesti, etsien merkkejä liuskan huonosta kiinnittymisestä kuten ilmakuplista pinnan ja liuskan välissä, väri vaihteluista tai pinnasta irtoavia liuskan reunoja. Liuskojen liimauksen yhteydessä venymäliuskojen pakkauksen tarkistuslistasta otettiin ylös käytetyn sarjan tiedot.



Kuvio 28. Asennetut liuskat 1 ja 2. Vedonpoisto X60 -kaksikomponenttiliimalla.

Antureiden asennuksen jälkeen venymäliuskat suojattiin lakkapinnalla ja SG250:llä, joka on läpinäkyvä, liuotinvapaa silikonikumi. Kuviossa 28 näkyviin johtimiin tehtiin vedonpoistot X60:llä, joka on pastamainen kaksikomponenttiliima. [5]

Venymäliuskojen liimauksen jälkeen liuskoissa valmiina olevien johtojen tilalle juotettiin kuviossa 29 näkyvät häiriösuojatut johtimet, joilla saatiin lisää pituutta ja minimoitiin johtimien aiheuttama häiriö. Johtimet suojattiin lopuksi vielä teippaamalla, jotta ne pysyisivät poissa tieltä liikkeiden aikana.



Kuvio 29. Koura siirrettiin johtojen reititykset ja vedonpoistot valmiina odottamaan mittauksia Pentin Pajalle.

Edellä mainittujen vaiheiden jälkeen varmistettiin vielä liuskojen kytkennät mittaamalla johdinten resistanssi kappaleen ja pinnan välillä. Tarkkoja mittauksia tehtäessä liuskat tulisi vielä peittää lämpöä eristävällä kerroksella, jonka pinnassa olisi sähköisiltä häiriöiltä suojaava metallinen folio. Liuskojen täytyy lisäksi antaa kuivua vähintään vuorokausi, ennen jännitteen kytkemistä. [5]

Mittalaitteistona käytettiin HBM:n valmistamaa Somat eDAQlite:a (kuvio 30), joka on kompakti versio Somat eDAQ:sta. Laitteistoa käytettiin yhdessä CatmanAP-ohjelman kanssa. Catman on Windows-pohjainen ohjelma, jota käytetään yleisesti HBM:n vahvistimien ohessa. [12]



Kuvio 30. Somat eDAQ lite – mittayksikkö.

Ohjelmassa on mahdollisuus tallentaa tehtyjen projektien asetukset ja hakea esiasetetut kanavatiedot tietokannasta. Venymäliuskat kytkettiin suoraan mittalaitteeseen, jossa oli kahden asennetun EBGR – kerroksen ansiosta mahdollisuus käyttää kahdeksaa erillistä kanavaa. Erillisten SMART – moduulien avulla voitiin kytkeä venymäliuskoja EHLS-kerrokseen, jolloin käytettävissä oli yhtä aikaa kymmenen kanavaa. Kaikkia liuskoja ei kuitenkaan voitu kytkeä samanaikaisesti, sillä jokainen rusettiliuska tarvitsi kolme kanavaa. [12]

Ennen mittauksia koura toimitettiin Pentin Pajalle sisätiloihin ja nostettiin telineeseen kiinnitettyyn rotaattoriin, joka näkyy kuviossa 31. Tämän jälkeen tehtiin tarvittavat letkuliitokset hydraulikkalaitteistoon, jolla liikkeitä ohjattiin. Valmisteluiden jälkeen kouran annettiin olla testitilassa yön yli, jolloin koura ehti tasaantua testiympäristön lämpötilaan. Mittaukset olivat staattisia, lyhytkestoisia ja suoritettiin sisätiloissa, jolloin olosuhteet pysyivät mittauksien ajan vakiona.



Kuvio 31. Koura kiinnitetty rotaattoriin ja hydrauliletkut liitetty.

Mittauksen aluksi suoritettiin tarkistus, jossa kouraa ajettiin tunnetuilla paineilla ja seurattiin pisteiden venymäarvoja. Alkuvaiheessa keskityttiin tunnettuihin tilanteisiin, joissa kouraa rasittivat laitteen oman sylinterin puristus, rotaattorin vääntö sekä niiden yh-

distetty kuormitus. Kouralla tehtiin puristuksia maksimipaineella ennen liuskojen nollausta ja mittausten aloittamista. Tällä menettelyllä pyrittiin varmistamaan, että rakenteeseen asennetut venymäliuskat mittaisivat pääasiassa vain rakenteen kokemia kuormituksista eivätkä sisäisiä, valmistuksessa syntyneitä jännityksiä.

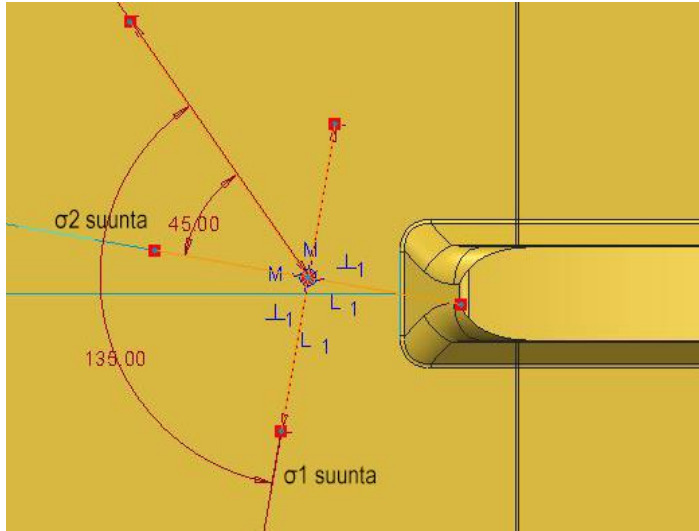
Kokeessa käytetyn palkin massa näkyi tuloksissa, mutta kouralla tehtävää puukuorman nostoa ei tässä ensimmäisessä vaiheessa testattu. Koska koura on mahdollista asentaa hyvin moneen erilaiseen koneeseen ajokoneesta kaivinkoneeseen, nostovoimien voitiin myös olettaa vaihtelevan laidasta laitaan.



Kuvio 32. Vääntökuormituksen toteuttaminen.

Mittaukset aloitettiin suorittamalla staattisia mittauksia. Kouran kärkien väliin suljettiin teräspalkki, jota vasten liikkeet tehtiin. Kuvion 32 tilanne vastasi kärkien väliin jäävää puuta. Tilanne jossa kärkien väliin jää puu, arveltiin aiheuttavan kouralle suurimmat jännitykset sulkuliikkeen aikana.

Rusettiliuskat mittasivat jännitystä kulmavälein 0° , 45° ja 90° (suunnat a, b ja c). Mittauspisteissä vaikuttavien venymien avulla laskettiin pääjännitykset ja niiden suunnat eri kuormitus tilanteissa (kuvio 34). Liitteessä 2 on esitetty suuntien määrittäminen periaatte.

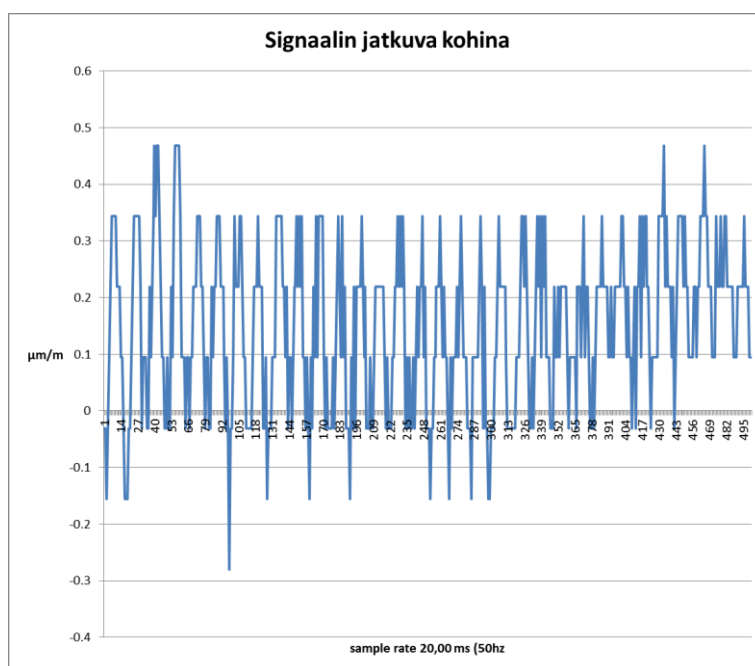


Kuvio 34. Rusettiliuskan venymien tuloksista voitiin määrittää kulma, joka osoittaa pääjännityksen σ_1 suunnan. Kuvassa kulma on 135 astetta, jolloin pääjännitys σ_2 on rusettiliuskan mittaruudukon b suuntainen.

Hot spot-kohtaa mittaavien venymäliuskojen venymänarvojen avulla ekstrapoloitiin jännitykset hitsin rajaviivoille. Mittauspisteissä, joissa pääjännityksien suunnat pystytettiin luotettavasti määrittämään, laskettiin myös liuskojen suuntaiset jännitykset.

4.4.5 Virhearviointi

Venymäliuskojen itsensä aiheuttaman mittavirheen arvioitiin olevan hyvin pieni verrattuna muihin mahdollisiin tekijöihin. Saaduista kuvaajista nähtiin, että mittausten arvojen vaeltaminen oli vähäistä mittausten aikana ja kuvaajissa esiintynyt jatkuva kohina oli noin $0,5 \mu\epsilon$:n suuruista (kuvio 35). Liuskat reagoivat kuormitustilanteisiin odotetusti eivätkä venymäliuskat päässeet lämpiämään lyhytaikaisissa mittauksissa, joka näkyi nollapisteen vakiona pysymisenä testitilanteiden yli.



Kuvio 35. Mittaussignaalin kohina.

Kuormitusten aikana ei nähty sellaisia suuria heilahduksia, joita ei olisi saanut liitettyä kuormituksen muutokseen. Suurimmat virheet liittyivätkin testin kuormitussuuntiin ja venymäliuskojen liimauksiin, sillä venymäliuskojen liimaaminen tiettyyn kulmaan käsin osoittautui hankalaksi.

4.5 Mittausta vastaava FEM – analyysi

Kouralle suoritettiin toinen FEM – analyysi Creo Parametric Simulate – ohjelmistolla mallintaen samoja rasiustilanteita ja voimia, kuin toteutetussa venymäliuskamittauksessa. Analyysin valmisteluissa otettiin mittauspisteiksi antureiden asennuskohdat, jotta FEM – analyysin tuloksia voitiin vertailla mitattuihin tuloksiin. Näin Creon antamista

tuloksista pystyttiin hakemaan taulukkomuodossa halutut venymät yksittäisten liuskojen pisteiden kohdalta, liuskojen suuntaisesti. FEM – analyysien tulokset on esitelty kokonaisuudessaan Outokummun Metalli Oy:lle toimitetuissa liitteissä.

4.5.1 Tulokset

Varsinaisia mittaustilanteita vastaavat voimat olivat pienempiä kuin alustavissa analyyseissä, pienemmän käytetyn paineen takia. Puristuksia tehtiin 225, 250 ja 280 baarin paineella. Väännöt kiinniollessa, aukiollessa ja yhdistettynä tehtiin 220 baarin paineella ensin myötäpäivään ja sitten vastapäivään. Puukuorma oli mukana alustavissa FEM – analyyseissä, mutta staattisissa mittauksissa käytettiin ainoastaan taivutuspalkin massaa ja kokeen olosuhteista johtuen, nostovoimia ei otettu mukaan rasiustapauksiin.

Tuloksista koostettiin taulukot, joissa venymäliuskojen kohdilta saatiin liuskojen suuntaiset venymät sekä mittauspisteissä liuskojen suuntaiset jännitykset. Rusetien osalta analyysin tuloksista nähtiin mittapisteiden pääjännitykset ja vaikutussuunnat. Creo Parametric Simulate – ohjelmalla voitiin myös tarkastella jännityksiä yleisesti koko osan alueella. FEM – analyysien ja venymäliuskamittausten tulokset on esitelty kokonaisuudessaan Outokummun Metalli Oy:lle toimitetuissa liitteissä.

5 Tulosten vertailu staattisessa kuormituksessa

Oletusarvona vertailu ei tuota täysin samoja tuloksia käytetyn tietokonemallin ja todellisen hitsatun rakenteen geometriaeroista johtuen. FEM – analyysillä myös saatiin suuremmat venymän arvot useimmissa mitatuissa pisteissä. Mitatuista venymistä voitiin laskea suoraan pisteiden jännitykset. Kun materiaalin kimmomoduuli ja pääjännitysten suuruudet sekä suunnat olivat tiedossa. Vertailun tarkoituksena oli selvittää, löytyykö rakenteiden jännityskäyttäytymisestä yhteneväisyyksiä FEM – analyysien kanssa. Tulosten luotettavuutta voitiin arvioida vertaamalla pääjännityksiä, vastaavan pisteen arvoihin FEM-mallissa.

Tuloksia vertailtaessa nähtiin paikoittain hyvää vastaavuutta mutta toisaalta myös täysin eri tuloksia, joista suurimmat eroavaisuudet löytyivät putkipinnalle asennetuista hot spot – liuskoissa. Kouran sisemmällä reunalla olevissa liuskoissa 5 ja 6, joissa puristuksen aikana pääjännityksen suunta oli kouran reunan suuntainen, nähtiin hyvää vastaavuutta tulosten välillä. Pääjännitysten suunnat laskettiin levypinnoille asennettujen rusettiliuskojen avulla, joista myös nähtiin tapahtuiko levyissä taipumista sivusuuntaan. Tilanteet joissa yksikään mitattu arvo ei vastannut edes likimain FEM-mallin antamia tuloksia, viittasivat todennäköisesti puhtaasti testitilanteen ja FEM – analyysin kuormitus suunnan eroon.

Hot spot – kohtia mittaavien liuskojen aktivoituminen puristuksissa oli vähäisempää, kuin analyysien perusteella olisi odottanut. Hot spot – kohtia mittaavien liuskojen 1- 4 tuloksia verratessa nähtiin suuria eroja myös väännöissä. Putken osuudella esiintyvät jännitykset ovat ilmeisesti pääosin kiertoa, sillä FEM – analyyseissä havaittua aksiaalista taipumista ei näkynyt juuri ollenkaan venymäliuskamittauksissa. Tulokset on esitelty kokonaisuudessaan Outokummun Metalli Oy:lle toimitetuissa liitteissä.

6 Puutavarakahmarin venymäliuskamittauksen suunnittelu kenttäolosuhteisiin

Kouran käyttäytymistä haluttiin selvittää venymäliuskamittauksella, todellisesta työnteosta aiheutuvien kuormitusten tapauksessa. Joissa mukana olisivat puukuorma ja koneen liikkeiden yhteisvaikutukset, kuten kiihtyvyyksien, massojen ja puukuorman tasauksien iskumaiset kuormitukset. Jo tehdyistä FEM – analyyseissä havaittiin kouran akselitappeja varten tehtyjen aukkojen reunan jännitys, johon syntyvistä rasituksista haluttiin saada mittaamalla enemmän tietoa.

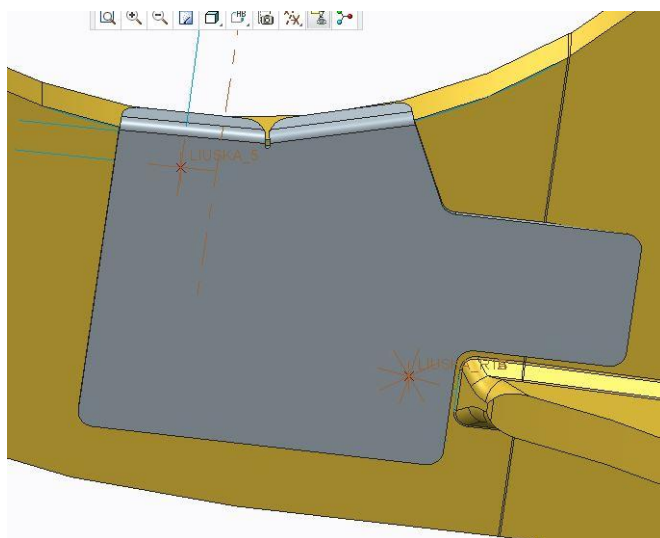
Ajatuksena olisi tehdä kenttäkokeessa saaduista tuloksista rainflow – luokittelun mukainen tulosten käsittely ja selvittää siten puutavarakouran väsymiskestävyyttä. Rainflow – menetelmällä voidaan jännitys-aikakäyrän näytteistä saada kertymään tarvittavat jännityksen vaihteluvälit. Rainflow – menetelmä mahdollistaa Minerin vaurioteorian käytön rakenteen eliniän määrittämiseen. [7]

Staattisista mittauksista saatuja tuloksia voitaisiin hyödyntää venymäliuskojen asemoinnissa ja linjauksessa. Rakenteen pääjännitysten suunnat kuitenkin vaihtelevat kuormituksen mukaan kiinnostavissa mittauspisteissä. Joten käytettävien venymäliuskojen tulisi olla rusettiliuskoja, joilla pääjännitykset ja niiden suunnat voitaisiin laskennallisesti selvittää. Todellisessa metsässä tehdystä puunsiirtotyöstä saatuja venymän arvoja ei kyettäisi suoraan vertaamaan FEM-malliin, tuntemattomien ja vaihtelevien kuormitusten takia.

Kenttäolosuhteissa suoritettava venymäliuskamittaus on aina vaativampi kuin sisätiloissa tehtävä. Mittauslaitteen suojaus, mittadatan tallentaminen ja johdotusten teko täytyy suunnitella, sekä laitteiden kiinnityskohtien valinta ja lämpökompensoinnin toteuttaminen. Kompensointi on otettava puutavarakourassa huomioon, sillä hydraulisylitereitä käytettäessä rakenne lämpiää ja ulko-olosuhteet todennäköisesti muuttuisivat testin aikana. Lämpötilan kompensointi toteutettaisiin kiinnittämällä yksi venymäliuska erilliselle palalle kourassa käytettävää levymateriaalia, joka sijoitettaisiin mittalaitteen yhteyteen niin, ettei sen kautta välittyisi kuormituksesta syntyviä voimia.

Laitteen sijoittaminen koneeseen päätettiin järjestää puomin juureen sen sijaan, että mittalaite olisi kiinnitetty itse kouraan. Jolloin täytyi miettiä koneen puomia pitkin tehtävi-

en johdotuksien toteuttaminen, sekä niiden suojaaminen. Johdotuksien tekoon täytyisi varata metsäkoneissa hydraulikkaletkujen suojauksessa yleisesti käytettyä muovispiraalaa, jolla johdot saataisiin niputettua siististi. Kuviossa 36 näkyy lisäksi yksi liuskojen suojaukseen hahmotelluista metallilevyistä, jotka olisi hitsattava kouran levyjen sisäpintaan suojaamaan venymäliuskoja.



Kuvio 36. Venymäliuskojen suojaukseen hahmoteltu metallilevy. Levyn alla liuska 5, jonka toiminta oli hyvää staattisissa mittauksissa ja rusettiliuska R1.

Virransaannin toteuttaminen eDaq:ille puutavarakoneen virran ulosottopisteestä vaatii näiden kahden väliin jännitteenmuuntimen, jolla saataisiin ELCOM -prosessoria (max. 18 voltia) käyttävälle mittalaitteelle muutettua työkoneissa yleisesti käytetty 24 voltin käyttöjännite 12 volttiin.

Hot spot – liuskat jätettäisiin pois ja kaikissa mittauspisteissä päätettiin käyttää rusetteja, joilla saatujen tulosten varmentaminen olisi helpompaa, lukuun ottamatta liuskoja 5 ja 6. Tämän lisäksi kouran runkoon, akselilaakerin läheisyyteen sijoitettaisiin yksi rusettiliuska mittaamaan rungon taipumista ja laakeripintojen läheisyyteen syntyviä jännityksiä.

7 Pohdinta

Työn tuotoksena saatiin suoritettua Outokummun Metalli Oy:lle venymäliuskamittaukset staattisilla kuormituksilla. Näiden avulla voitiin arvioida rakenteen kestävyyttä. Tietysti oikean työn aikaisista käyttötestauksista saadut tiedot ovat varmasti käyttökelpoisempia, kuin staattisessa kuormitustapauksessa tehdyt mittaukset. Paras hyöty saataisiin pitkäaikaisesta työkokeesta, jossa mitattaisiin kouran rungon eri pisteiden rasituskertymää ja laitteen laakeripinnoille tulevia voimia oikeilla nopeuksilla ja iskuilla.

FEM – analyysien antamat arvot olivat tehdyissä analyyseissä suurempia kuin mittamalla saadut arvot. Rakenteita elementtimenetelmällä analysoimalla voidaan kuitenkin havaita joitain jännityksien aiheuttamia ongelmia jo suunnitteluprosessin aikana, jolloin suunnittelija voi arvioida muutoksia ennen mahdollisen prototyypin rakentamista. Venymäliuskamittaus antaa parhaat tulokset, kun kuormitustilanne tunnetaan perusteellisesti, kuten esimerkiksi vetosauvoissa.

Venymäliuskojen käyttö hot spot – kohtien tarkastelussa tuotti ylimääräistä haastetta ja saatujen tulosten mukaan jäätiinkin eri tuloksiin FEM – analyysien kanssa. Tuloksissa nähtiin jännityksien suuria hyppäyksiä hyvin pienillä alueilla epäjatkuvuuskohtien juuressa, etenkin hitsien rajaviivojen pyöristyksillä. Jälkeenpäin ajateltuna hot spot – kohtien venymäliuskat olisivat todennäköisesti toimineet paremmin, jos kuormitustapauksia olisi saanut järjestettyä selkeämmin sivukuormaksi. Todellisessa käytössä rakenteessa kuitenkin todennäköisesti esiintyy vääntöä ja vaihtelevia kuormituksia puiden nostojen yhteydessä, siis myös muuta kuin pelkkää auki ja kiinni liikettä.

FEM – tuloksien konvergoitumisessa päästiin jännityksissä muutaman prosentin virheeseen maksimipääjännityksestä, kaikkien kuormien osalta. Venymäliuskamittauksien mukaan elementtimalli ei kuitenkaan kuvannut kunnolla todellista rakennetta tutkituissa kohdissa. Virheet johtuivat mahdollisesti liian yksinkertaistetusta FEM-mallista. Tai palkin todellinen käyttäytyminen estyi, tuennan ollessa liian jäykkä verrattuna todelliseen rakenteeseen. Hitsin todellisen ja tarkan geometrian ja rajaviivan vaikutusta ei myöskään todennäköisesti huomioitu riittävällä tarkkuudella. Käytössä on oltava erittäin tarkka rakennemalli, jota voidaan käyttää FEM – analyysin kanssa pääjännitysten suunnitelmien määrittämisessä.

Puristuksien aikana kolmioiden kärkien läheisyydessä ei runkoputkessa syntynyt taipumaa samalla tavalla kuin FEM – tuloksissa. Useamman liuskan käyttö putkipinnalla olisi paljastanut jännityksien todelliset suunnat, ottaen huomioon jo saadut venymäliuskamittausten tulokset runkoputken olemattomista aksiaalisista voimista. Tuloksissa havaittujen erojen takia voitiin todeta, ettei rakenteen mahdollinen lujuustarkastelu tällä tarkkuudella ollut ainakaan hitsien rajaviivojen mittauspisteiden osalta riittävää. FEM – analyysien ja venymäliuskamittausten tulokset on esitelty kokonaisuudessaan Outokummun Metalli Oy:lle toimitetuissa liitteissä.

Uusina tutkimuskohteina kärkilevyn taipuman tutkiminen voisi olla hyödyllistä, sillä kärjen hitsaukset ovat olleet vahinkoherkkiä useissa samankaltaisissa malleissa. Mutta tämän opinnäytetyön yhteydessä mittauksissa ongelmaksi olisi todennäköisesti tullut johtojen irtoaminen ja venymäliuskojen vahingoittuminen. FEM – analyysia varten ajateltiin saavan muualtakin rakenteesta tarpeeksi vertailtavaa.

Oma tietoni venymäliuskoista, niihin liittyvästä teoriasta ja mittauksien vaiheiden suunnittelusta karttui sen verran, että venymäliuskamittaus saatiin onnistumaan tässä työssä. Tiedot väsymiskestävyydestä ja Creo Parametric Simulate – ohjelmiston käytöstä syntyivät opinnäytetyön aikana, sillä omaa pohjatietoa pääsi hyödyntämään oikean ongelman parissa. Työn hyöty oli siitä saadun kokemuksen ja opinnäytetyön aiheen parissa tehdyn harjoittelun osalta suuri opinnäytetyön tekijälle.

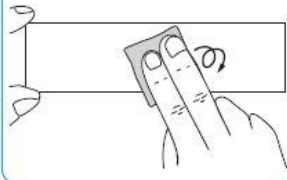
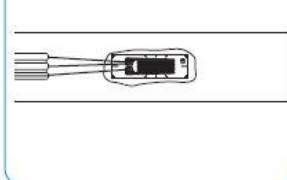
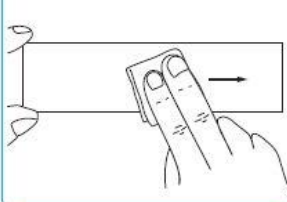
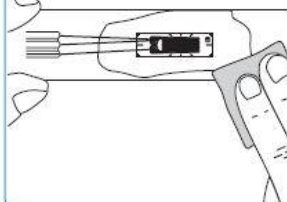
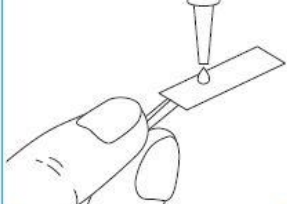
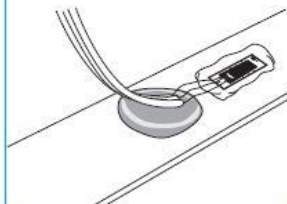
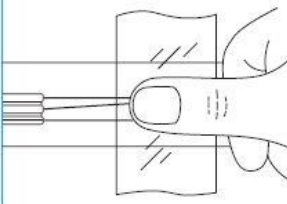
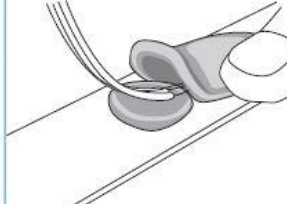
Lähdeluettelo

1. Outokummun Metalli Oy. 2015. Internet sivusto.
http://www.outokummunmetalli.fi/osaaminen_kokemusta.php. 8.6.2015.
2. Outokummun Metalli Oy. 2015. Internet sivusto.
http://www.outokummunmetalli.fi/yritys_vahvatjuuretmetallissa.php. 8.6.2015.
3. Outokummun Metalli Oy. 2015. Internet sivusto.
http://www.outokummunmetalli.fi/yritys_waratah.php. 8.6.2015.
4. Outokummun Metalli Oy. 2015. Vahva-kahmari esittelymateriaali. Power-Point-esitys. Luottamuksellinen.
5. Hoffmann, Karl 1989. An introduction to Measurements using Strain Gages. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
6. Kyowa. 2012. Kyowa strain gauge e-catalog. Saatavissa:
http://www.rmc.com.tr/wp-content/uploads/2012/08/straingage_cat_e.pdf. 10.2.2015.
7. Niemi, E et al. 1998. Väsymättömän hitsausliitoksen suunnittelu. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, konstruktitekniikan laitos. Lappeenranta. 149 s.
8. SFS-EN-1993 1-9. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen. Helsinki. Suomen standardoimisliitto SFS. 44 s. 2005.
9. Hobbacher, A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW Doc. XIII-2151-07. 2007.
10. Cook, R.D. 1995. Finite Element Modeling for Stress Analysis. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-10774-3. 320 s.
11. Logan D.L. 2007. A First Course in the Finite Element Method, Fourth Edition. [Verkkokirja]. Canada: Nelson, a division of Thompson Canada. Saatavissa:
http://www.cengagebrain.com.mx/shop/content/logan52986_0534552986_02.01_chapter01.pdf.
12. HBM. Operating Manual SoMat eDAQlite with TCE Software. Saatavissa:
<http://www.hbmdoc.com/en/data-acquisition-systems/somat/somat-edaqlite.html>. 10.4.2015.

Liite 1. Venymäliuskan asennuksen vaiheet

Typical Strain Gage Bonding Method and Dampproofing Treatment

The strain gage bonding method differs depending on the type of adhesive applied. The description below applies to a case where the leadwire-equipped KFG gage is bonded to a mild steel test piece with a representative cyanoacrylate adhesive, CC-33A. The dampproofing treatment is in the case of using an butyl rubber coating agent, AK-22.

	<p>① Like drawing a circle with sandpaper (#320 or so), polish the strain gage bonding site in a considerably wider area than the strain gage size.</p> <p>(If the measuring object is a practical structure, wipe off paint, rust and plating with a grinder or sand blast. Then, polish with sandpaper.)</p>		<p>⑤ When the adhesive is cured, remove the polyethylene sheet and check the bonding condition. Ideally, the adhesive is slightly forced out from around the strain gage.</p>
	<p>② Using an absorbent cotton, gauze or SILBON paper dipped in a highly volatile solvent such as acetone which dissolves oils and fats, strongly wipe the bonding site in a single direction to remove oils and fats. Reciprocated wiping does not clean the surface.</p> <p>After cleaning, mark the strain gage bonding position.</p>		<p>⑥ If the adhesive is widely forced out from around the gage base, remove the protruding adhesive with a cutter or sandpaper. Place gage leads in a slightly slackened condition.</p>
	<p>③ Make sure of the front (metal foil part) and the back of the strain gage. Apply a drop of adhesive to the back and immediately put the strain gage on the bonding site. (Do not spread the adhesive over the back. If so, curing is adversely accelerated.)</p>		<p>⑦ Put up the leadwire from before the part where the adhesive is applied. Place a block of the coating agent below the leadwire with gage leads slightly slackened.</p>
	<p>④ Cover the strain gage with the accessory polyethylene sheet and strongly press the strain gage over the sheet with a thumb for approximately 1 minute (do not detach midway). Quickly perform steps 3 and 4. Otherwise, the adhesive is cured. Once the strain gage is put on the bonding site, do not put it up to adjust the position.</p>		<p>⑧ Completely cover the strain gage, protruding adhesive and part of the leadwire with another block of the coating agent. Do not tear the block to pieces but slightly flatten it with a finger to closely contact it with the strain gage and part of the leadwire. Completely hide protrusions including gage leads behind the coating agent.</p>

"Strain Gage Bonding Manual" is available from KYOWA at a price of ¥1,200 per copy. If required, contact your KYOWA sales representative.

Liite 2. Pääjännitysten ja suuntien laskenta kolmehilaisista rusettiliuskoista

Analysis of the biaxial stress state with unknown principal directions

The principle of experimental stress analysis using strain gauges (SG) consists in using strain gauges to measure strains on the component surface.

From these measured strains and the known material properties (modulus of elasticity and Poisson's ratio), the absolute value and the direction of these mechanical stresses are determined. These calculations are based on Hooke's Law which applies to the elastic deformation range of linear-elastic materials.

In experimental stress analysis, so-called 3-grid rosettes are used for strain measurement. These are available in $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ and $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ versions. Both forms have a historical background.

It is up to the user to choose which version to use.

The 3 measuring grids of the rosettes are designated with the letters a, b and c. Therefore, a 3-grid rosette measures the three strains ε_a , ε_b and ε_c .

The principal normal stresses σ_1 and σ_2 are calculated for the $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ rosette using the formula:

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}$$



$0^\circ/45^\circ/90^\circ$ rosette
e.g. RY3x

and for the $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ rosette:

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}$$



$0^\circ/60^\circ/120^\circ$ rosette
e.g. RY7x

The principal directions are determined below. First the tangent of an auxiliary angle ψ is calculated.

For the $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ rosette using the formula:

$$\tan \psi = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad \left| \quad \frac{Z}{N} \right.$$

and for the $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ rosette according to the formula:

$$\tan \psi = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \quad \left| \quad \frac{Z}{N} \right.$$

Note: The tangent of an angle in the right-angled triangle is the ratio of the opposite side (numerator N) to the adjacent side (denominator D):

$$\tan \psi = \frac{\text{Opposite side}}{\text{Adjacent side}} = \frac{Z}{N}$$

This ambiguity of the tangent makes it necessary to determine the signs of the numerator (N) and the denominator (D) before carrying out the final calculation of the two above mentioned quotients. Determining the signs is important because they alone indicate the quadrant of the circular arc in which the angle ψ is located.

From the value of the tan, the value of the intermediate angle ψ must first be determined:

$$|\psi| = \arctan [^\circ]$$

Then the angle φ should be determined using the following scheme:

$$\left. \begin{array}{l} Z \geq 0 (+) \\ N > 0 (+) \end{array} \right\} \quad \varphi = \frac{1}{2}(0^\circ + |\psi|)$$

$$\left. \begin{array}{l} Z > 0 (+) \\ N \leq 0 (-) \end{array} \right\} \quad \varphi = \frac{1}{2}(180^\circ - |\psi|)$$

$$\left. \begin{array}{l} Z \leq 0 (-) \\ N < 0 (-) \end{array} \right\} \quad \varphi = \frac{1}{2}(180^\circ + |\psi|)$$

$$\left. \begin{array}{l} Z < 0 (-) \\ N \geq 0 (+) \end{array} \right\} \quad \varphi = \frac{1}{2}(360^\circ - |\psi|)$$

The angle ψ found in this manner should be applied from the axis of the reference measuring grid a in the mathematically positive direction (counterclockwise). The axis of the measuring grid a forms one arm of the angle ψ . The other arm represents the first principal direction. This is the direction of the principal normal stress σ_1 (identical with the principal strain direction ε_1). The point of the angle is located at the intersection of the axes of the measuring grids. The second principal direction (direction of the principal normal stress σ_2) has the angle $\varphi + 90^\circ$.